

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN MIRADOR DE ESTRUCTURA MIXTA ACERO- HORMIGÓN EN VOLADIZO, ATIRANTADO A UN MÁSTIL DE HORMIGÓN ARMADO

DESIGN AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A CANTILEVER LOOKOUT TIGHTENED BY REINFORCED CONCRETE POLE

Autora

María Ruiz Zarza

Director

Luis Gracia Villa

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

2019 – 2020

AGRADECIMIENTOS

A mi abuela Carmen, por enseñarme a conseguir todo lo que me proponga.

A mis padres, por apoyarme y animarme siempre en todas mis decisiones. Gracias por hacerme más fácil el camino.

Al resto de mi familia, por confiar en mí y hacerme sentir grande siendo la pequeña.

A mis amigas de toda la vida, Majo, Sara, Elena y Claudia, por seguir viéndonos conseguir nuestros sueños cada una en su dirección.

A LST, por sentirse orgullosas de mí y seguir celebrando juntas todos nuestros éxitos.

A María y Paloma, por ser las mejores amigas con quien compartir profesión que me ha dado la universidad.

DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL
DE UN MIRADOR DE ESTRUCTURA
MIXTA ACERO-HORMIGÓN EN
VOLADIZO, ATIRANTADO A UN
MÁSTIL DE HORMIGÓN ARMADO

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado ha sido realizado por María Ruiz Zarza en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza y tiene como título: "Diseño y análisis estructural de un mirador de estructura mixta acero-hormigón en voladizo atirantado a un mástil de hormigón armado".

El desarrollo del mismo se ha llevado a cabo en diferentes fases de forma continuada hasta la redacción de la memoria final. Primeramente, se hizo una revisión de algunos de los miradores más populares del mundo con el fin de resaltar cuáles eran las características que más me llamaban la atención para posteriormente analizar cómo introducirlas en el proyecto. Sin duda, los que más captaron mi atención eran los que contaban con voladizo así que, con esta idea clara, se decidió dotar a la estructura de unas dimensiones de casi el doble de las de los miradores en voladizo más grandes del mundo; para ello, se recurrió a un pilono de contrapeso con tirantes siendo estos últimos pretensados para limitar la flecha y que la pasarela quede horizontal con carga permanente.

Conocidos los elementos clave, se diseñó el modelo previo en Auto CAD para definir las dimensiones y, tras algunas modificaciones, se pasó a diseñar el modelo final decidido en Dlubal. A continuación, se seleccionó de la biblioteca interna del programa los materiales que compondrían los distintos elementos de la estructura: acero y hormigón.

Una vez realizado el diseño estructural preliminar que sirve de base para la generación del modelo de elementos finitos para el análisis estructural, se procede a la inserción de cargas teniendo en cuenta la normativa vigente relacionada.

Mediante un procedimiento iterativo de prueba-error se ajustan las dimensiones hasta conseguir el cumplimiento de todos los requisitos de la normativa, se analizan los resultados y se extraen las conclusiones.

Por último, se redacta la memoria final de todo el proyecto.

ÍNDICE

1. Introducción

- 1.1. Motivación
- 1.2. Objetivo
- 1.3. Alcance

2. Estado del arte

3. Normativa de aplicación

4. Diseño estructural

- 4.1. Geometría y dimensiones
 - 4.1.1. Mirador
 - 4.1.2. Mástil
 - 4.1.3. Tirantes

5. Inserción de cargas en el modelo

- 5.1. Casos de carga y magnitud
 - 5.1.1. Temperatura
 - 5.1.2. Peso propio
 - 5.1.3. Pretensado
 - 5.1.4. Viento +X, -Y, +Y
 - 5.1.5. Sobrecarga de uso total y parcial
 - 5.1.6. Barandilla
 - 5.1.7. Nieve
- 5.2. Combinaciones de carga
 - 5.2.1. Estados límite de servicio (ELS)
 - 5.2.2. Estados límite últimos (ELU)

6. Resultados

- 6.1. Resultados de las combinaciones de cargas ELS
- 6.2. Resultados de las combinaciones de cargas ELU

7. Conclusiones

ANEXOS

Propiedades de los materiales

Hormigón C30/37

Acero S 420 N

Cable de pretensar St 1600/1860

Configuración de la malla de EF

Método de cálculo

Método de Elementos Finitos

Programa de cálculo RFEM 5

Cálculo de las acciones variables

Temperatura

Viento

Nieve

Coeficientes de combinación de cargas

Valores máximos admisibles de tensiones

Hormigón

Acero S 420 N

Cable de pretensar St 1600/1860

Resultados de deformaciones globales para las distintas combinaciones de carga

Resultados de tensiones máximas para las distintas combinaciones de carga

Cajón metálico

Mástil

Tirantes

PLANOS

Plano Nº 1 – Mástil

Plano Nº 2 – Tablero

Plano Nº 3 – Cajón metálico

Plano Nº 3.1 – Diafragmas con rigidizadores del cajón metálico

Plano Nº 3.2 – Diafragmas del cajón metálico

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE ECUACIONES

ÍNDICE DE FIGURAS

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Mi inquietud y admiración sobre construcción y estructuras ya existía antes de comenzar el Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales, y se afianzó con asignaturas como “*Mecánica de sólidos deformables*”, “*Resistencia de materiales*”, “*Edificación Industrial*” y “*Análisis estructural e instalaciones industriales*” por lo que tuve claro que mi Trabajo de Fin de Grado estaría orientado en este ámbito.

Para determinar qué tipo de estructura llevar a cabo, empecé buscando imágenes de naves y puentes. Es evidente la disparidad que existe en el diseño de naves industriales debido a diferentes soluciones constructivas que desarrolla la creatividad humana, pero, aun así, no encontraba en ellas la motivación que esperaba.

Fue analizando distintas tipologías de puentes cuando di con la imagen de un mirador en voladizo, la cual me llevó a investigar más acerca de estas estructuras y encontrar en ellas la inspiración y motivación que me había faltado para definir mi propio diseño (inspirado en algunos ya existentes) y posteriormente llevar a cabo su análisis estructural.

1.2. Objetivo

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es el diseño y análisis estructural de un mirador de estructura mixta acero-hormigón en voladizo atirantado a un mástil de hormigón armado.

La mayor parte del trabajo se desarrolla en RFEM, módulo principal del programa Dlubal, donde aplicando los conocimientos adquiridos durante el Grado se busca determinar las dimensiones necesarias para el cumplimiento de la normativa vigente.

1.3. Alcance

El alcance del proyecto está definido por diferentes partes. Primeramente, se ha realizado una revisión de distintas tipologías de miradores existentes con el fin de obtener ideas para el diseño previo (*apartado 2.1, página 8*).

Conocidos los elementos que compondrían la estructura global (pasarela, mástil y tirantes) se diseña un modelo previo en Auto CAD para definir las dimensiones.

Posteriormente, se ha definido el modelo en el programa Dlubal donde tras la selección de los materiales que compondrán los distintos elementos de la estructura, y asegurando el cumplimiento de la normativa vigente asociada, se han insertado las cargas y combinaciones de estas que afectan a la estructura.

Definido el diseño completo del conjunto estructural, se genera el modelo tridimensional de elementos finitos para el análisis mediante el programa RFEM de Dlubal. Una vez el programa ha ejecutado los cálculos, se procede al análisis de los resultados y verificación de estos.

Podría decirse que el principal reto que plantea esta estructura es las grandes dimensiones del voladizo. Haciendo una comparativa con algunos de los miradores en voladizo más grandes del mundo, la longitud de este prácticamente dobla en magnitud la de los ya existentes.

Para llevar a cabo su ejecución, se ha recurrido a un pilono de contrapeso inclinado (para equilibrar las cargas del tablero) y tirantes traccionados (para transmitir las cargas desde el tablero hasta el mástil que trabaja a compresión).

2. ESTADO DEL ARTE

Antes de llevar a cabo el diseño propio del proyecto, se ha analizado diversos miradores existentes en el mundo. Algunos de ellos cuentan con tipologías similares al que se va a desarrollar, se muestran a continuación:

- Pasarela del voluntariado (Zaragoza): conecta los barrios de La Almozara y el Actur. El tablero tiene 277 metros de longitud, de los que 230 metros son en tramo curvo y 47 en tramo recto. Cuenta con 46 tirantes que provienen de un mástil de 75 metros de altura, con una inclinación de 30° y una anchura de 4,5 metros que sujetan el tablero. [1]



Figura 1 – Pasarela del voluntariado (Zaragoza) [2]

- Puente del Alamillo (Sevilla): consta de un único pilar que actúa de contrapeso para los más 200 metros del puente gracias a 26 tirantes. El pilono tiene una altura de 142 metros, una inclinación de 48° . El tablero está formado por una losa de hormigón que descansa sobre un cajón y vuelos metálicos de 4 metros que parten del cajón. [3]



Figura 2 – Puente del Alamillo (Sevilla) [4]

- Sky Bridge en Langkawi (Malasia): la pasarela está formada por paneles de acero y hormigón colocados en la parte superior de una armadura triangular invertida, tiene 125 metro de largo y 1,8 metros de ancho. Está suspendido desde un pilono de 82 metros de altura mediante 8 cables; el diseño con forma curva maximiza la experiencia visual. [5]



Figura 3 - Sky Bridge en Langkawi (Malasia) [5]

- Grand Canyon Skywalk (Colorado): pasarela con suelo de vidrio en forma de herradura con una longitud de voladizo de 22 metros y situado a 1300 metros sobre el nivel del río. [6]



Figura 4 - Grand Canyon Skywalk (Colorado) [6]

- Mirador en el Parque Nacional de Longgang (China): también en forma de herradura y con suelo de vidrio, superando en algo más de 5 metros de voladizo al que había sido el mirador con suelo de cristal más largo del mundo (el Gran Cañón en Arizona). Ha sido construido con 150 piezas de vidrio laminado endurecido y 3000 toneladas de acero. [7]



Figura 5 - Vista en planta del mirador en el Parque Nacional de Longgang (China) [8]

3. NORMATIVA DE APLICACIÓN

Para el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado se tienen en cuenta diferentes normativas detalladas a continuación para el diseño y cálculo del proyecto.

- Código Técnico de la Edificación (CTE): utilizado para obtener las cargas de viento que actúan sobre la estructura.
- Norma IAP-11: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Será utilizada para la definición de las acciones y sus combinaciones, así como el establecimiento de los coeficientes de ponderación a considerar en el proyecto para permitir la verificación de tales elementos de la infraestructura desde el punto de vista de la funcionalidad y de la seguridad estructural. [9]
- Instrucción de Acero Estructural (EAE): su uso principal será para verificar las tensiones de los diferentes elementos de acero de la estructura. [10]
- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08): en ella se establecen los requisitos a tener en cuenta en el proyecto y ejecución de estructuras de hormigón (en este caso mástil y tablero) con el objeto de lograr los niveles de seguridad adecuados. [11]

4. DISEÑO ESTRUCTURAL

4.1. Geometría y dimensiones

El mirador consta de una estructura mixta acero-hormigón en voladizo atirantado a un mástil de hormigón.

4.1.1. Tablero

Es el elemento sobre el que se transita. El material utilizado para su fabricación es hormigón C30/37; cuenta con 3 metros de ancho y 15 cm de canto.

Este elemento se ha definido en Dlubal como un sólido, para lo cual se ha utilizado superficies de geometría plana y cuadrangular de espesor nulo.

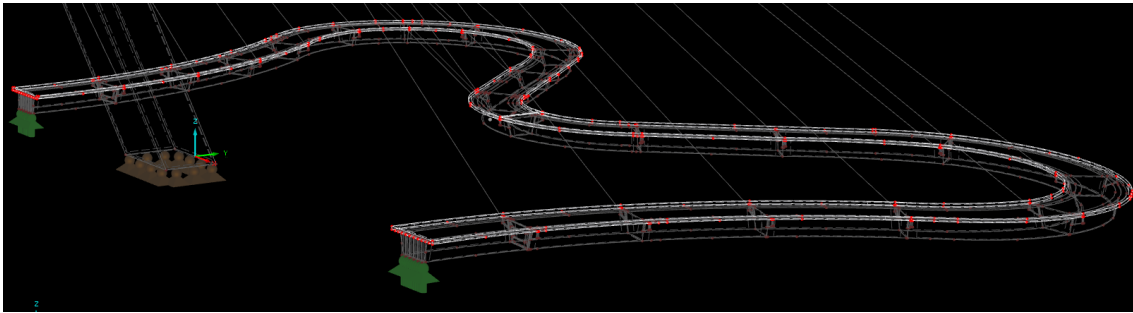


Figura 6 – Modelo del tablero en RFEM

4.1.2. Cajón metálico

Sobre él apoya el tablero. Está formado por chapas de acero S 420 de 40 milímetros de espesor soldadas entre sí. Además de los laterales y base del cajón, cuenta también con:

- 38 vuelos en forma de I distribuidos cada 6 metros desde el lado interior del tablero. Se colocan a ambos lados del cajón, son de sección variable y están reforzados con chapas que cierran todo el extremo del voladizo; de esta forma el cable tira de toda la viga y no sólo del alma que es la parte más débil.
- 22 diafragmas con la forma de la sección del cajón distribuidos cada 6 metros. Los dos diafragmas de cierre están reforzados con rigidizadores verticales (vigas UPN 300) y los dos siguientes con un marco rígido; así se evita el efecto local producido por la tracción del tirante y la reacción del apoyo en la base del cajón y en los diafragmas de cierre respectivamente.
- 2 rigidizadores longitudinales al cajón, colocados debajo del tablero.

Todos estos elementos han sido diseñados en Dlubal como superficies de acero S 420 y 40 milímetros de espesor.

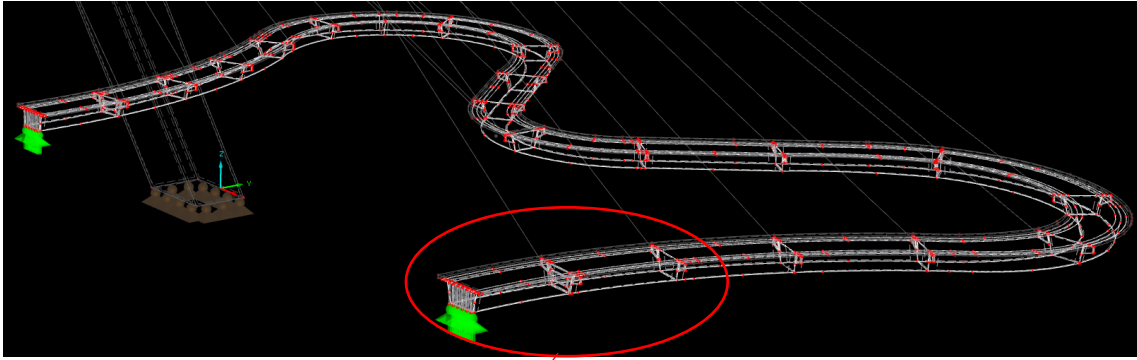


Figura 7 – Modelo del cajón metálico en RFEM

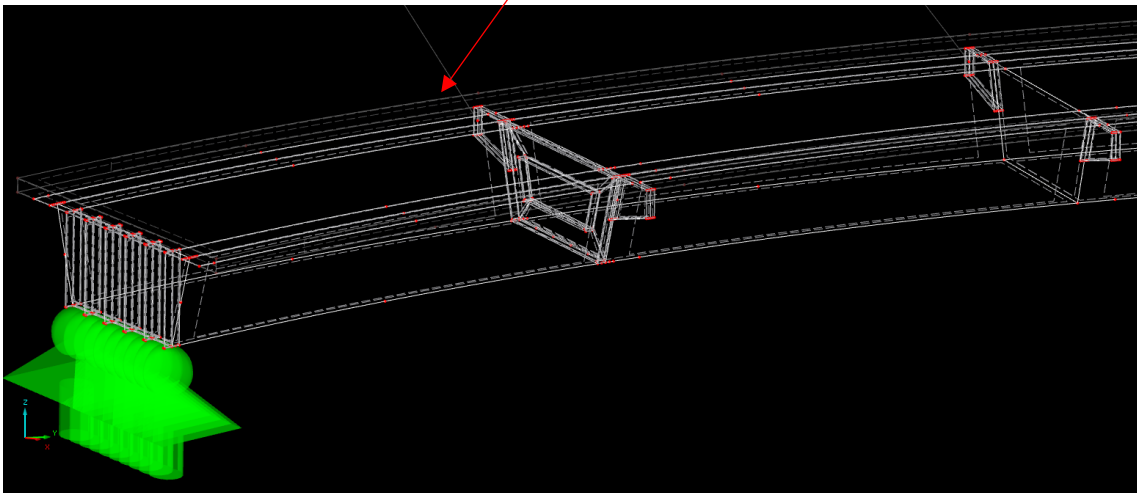


Figura 8 – Ampliación del modelo del cajón metálico en RFEM

4.1.3. Mástil

Al tratarse de un mirador atirantado, el mástil adopta un ángulo de inclinación de 65° respecto al terreno para contrarrestar las cargas de tracción del tablero del mirador.

Tiene forma de Y pero manteniendo el estilo curvo de la pasarela; cuenta con una altura máxima en vertical de 40,89 metros, de los cuales 22,72 son de la base y el resto de los brazos.

Las fuerzas transferidas por los cables atirantados se concentran en lo alto del mástil; allí se sujetan por unas camisas de acero (encastradas en una caja de acero dentro del mástil) que transmiten las fuerzas de tracción de los cables al pilono (que trabaja a compresión) hasta la base de este y la cimentación.

El modelo en Dlubal se ha realizado como un sólido mediante superficies de espesor nulo y con hormigón C30/37 como material.

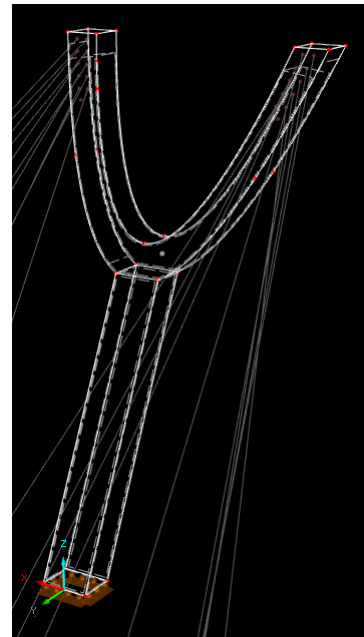


Figura 9 – Modelo del mástil en RFEM

4.1.4. Tirantes

Hay un total de 20, y su uso permite transmitir las cargas desde el tablero al mástil; todos ellos trabajan tracción.

En la superficie frontal curva del mástil, se distribuyen de forma homogénea en 5 filas (separadas entre sí 1 metro) albergando cada una de ellas dos tirantes; el otro extremo de estos va unido, mediante un tubo por donde se pasaría el cable para bloquearlo, al centro del alma de los vuelos para que transmitan la fuerza a la parte metálica y no al hormigón.

Los cables de pretensado se conectan a los vuelos del lado interior para no obstaculizar el tránsito de personas y se modelan como barras de tipo tracción a las que se les aplica una sección de 60 milímetros de diámetro y acero St 1660/1860.

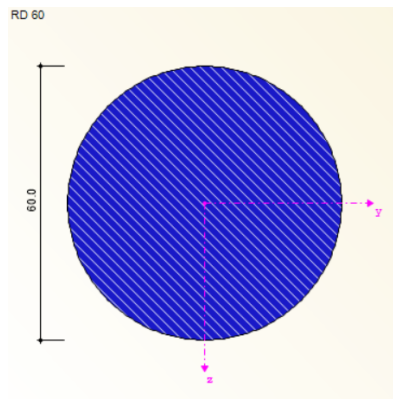


Figura 10 – Sección de los cables de pretensado

5. INSERCIÓN DE CARGAS EN EL MODELO

5.1. Casos de carga y magnitud

Los casos de carga definidos necesarios para el desarrollo del proyecto han sido 9:

- Uno de temperatura
- Dos de permanente, para el peso propio y el efecto de la barandilla
- Uno de pretensado para los tirantes
- Tres de viento, para tener en cuenta las direcciones +X, +Y, -Y (la dirección -X no se contempla porque la estructura es simétrica respecto al plano YZ)
- Dos de sobrecarga de uso, para analizar la estructura con sobrecarga de uso total y parcial.
- Uno de sobrecarga de nieve, aunque no se tendrá en cuenta por ser inferior al valor de sobrecarga de uso y no ser concomitante con ninguna otra carga variable.

5.1.1. Temperatura

La temperatura se tendrá en cuenta sólo con las cargas de permanente y la de pretensado; se trata de verificar que las dilataciones puedan ser absorbidas por los neoprenos sin generar esfuerzos adicionales.

Para el cálculo térmico, basta con poner una carga de temperatura uniforme en toda la pasarela de magnitud 30 °C (indicado en CTE).

El efecto de la temperatura hace que las superficies de acero se dilaten y los tirantes se destensen.

5.1.2. Peso propio

La carga de peso propio del modelo se define como un tipo de acción *Permanente* actuando en -Z y es calculada automáticamente por el programa con el peso específico y las áreas de la sección de las barras o superficies y sólidos usados.

5.1.3. Pretensado

Esta carga se aplica a los cables; un primer ajuste del valor sería conseguir que, para la combinación de cargas de peso propio y pretensado, la flecha sea prácticamente nula.

Los tirantes no tienen todos la misma carga de pretensado, sino que según su proximidad o lejanía al poste tienen un valor u otro. De este modo, se diferencian cuatro zonas como se puede observar en la *Figura 11*, según la magnitud de la carga sea de 400 kN (naranja), 1800 kN (verde), 1500 kN (azul) y 2000 kN (rosa).

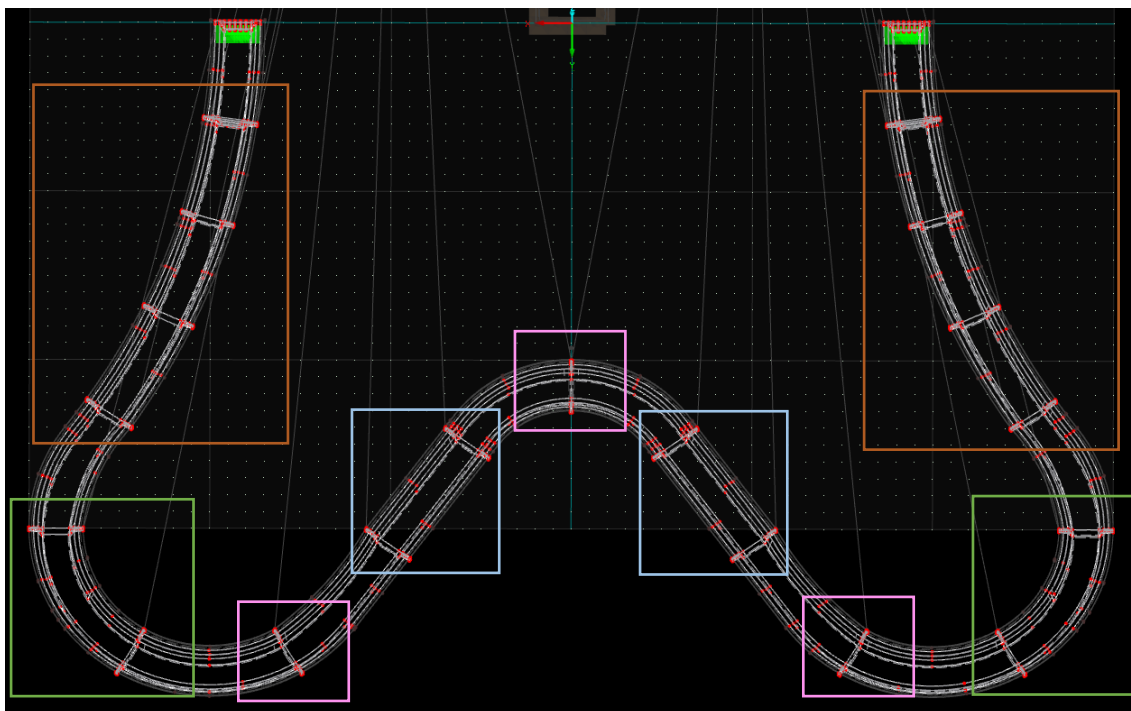


Figura 11 – Distribución de la carga de pretensado en los tirantes

5.1.4. Viento +X, -Y, +Y

Tabla 1 – CARGAS DE VIENTO

		Presión	Succión
q_e (kN/m²)	Laterales del cajón	0,8	0,5
	Tablero de hormigón	0,7	0,3
	Barandilla	0,8	0,6
	Mástil	0,8	0,7

La acción del viento sobre la barandilla se aplicará en el canto de la losa de hormigón.

- Tirantes:

$$\frac{q_e}{L} = 0,094 \frac{kN}{m}$$

5.1.5. Sobrecarga de uso total y parcial

Para el efecto en estudio, se considera la actuación de una sobrecarga de uso uniforme de 5 kN/m² sobre tablero.

Se tendrá en cuenta dos casos de carga, sobrecarga completa y sobrecarga sólo en la mitad del tablero que servirá para ver si se desequilibra.

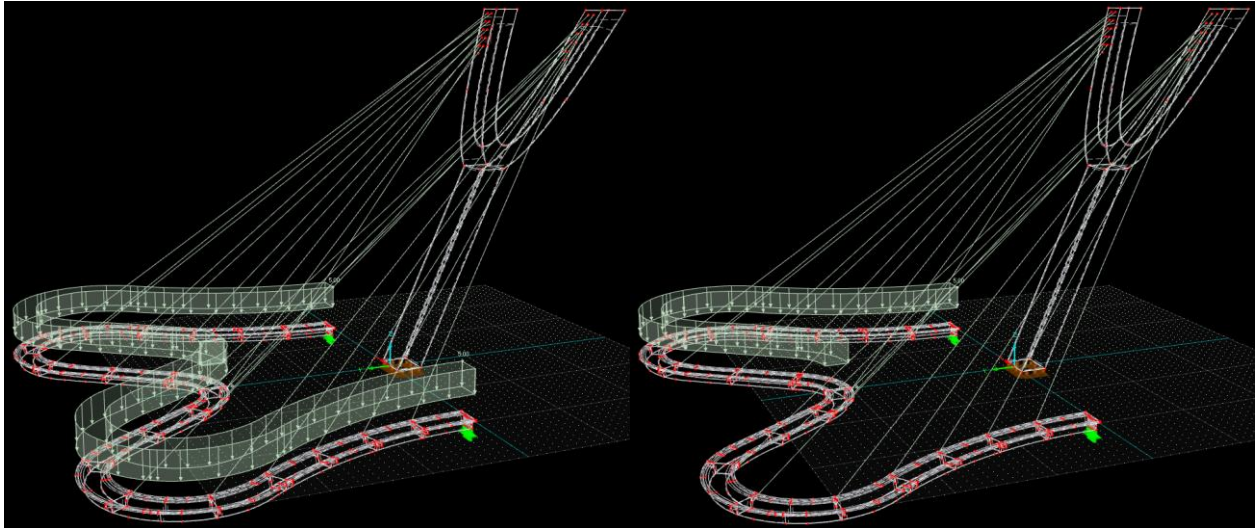


Figura 12 – Sobrecarga de uso total y parcial

5.1.6. Barandilla

Las fuerzas transmitidas por la barandilla al tablero se tienen en cuenta como una carga permanente de magnitud 1,5 kN/m.

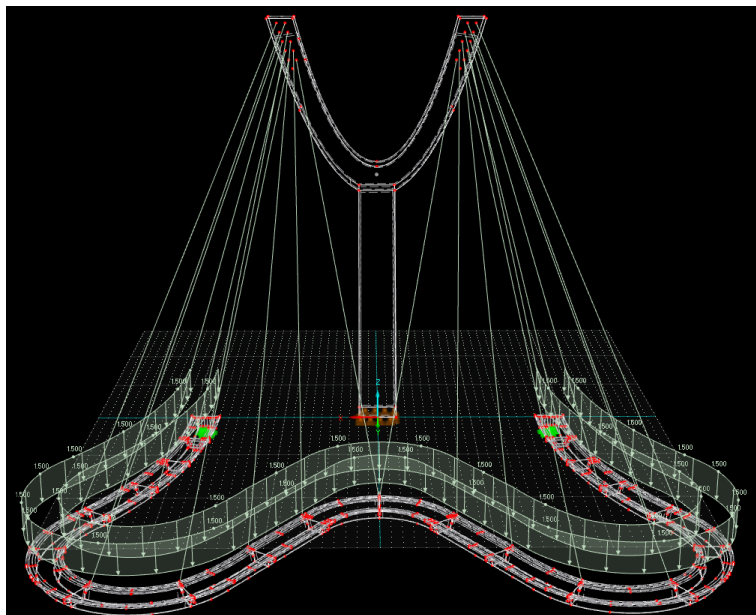


Figura 13 – Carga permanente debida a la barandilla

5.1.7. Nieve

Teniendo en cuenta las diferentes zonas de clima invernal y la altitud, los valores máximos de sobrecarga de nieve de acuerdo con la norma IAP-11 serían:

- Altitud ≤ 1800 metros para cualquier zona de clima invernal a excepción de la zona 6:

$$q_k = 0,8 \ s_k = 0,8 * 4,6 = 3,68 \frac{kN}{m^2}$$

- Altitud ≤ 1600 metros para la zona de clima invernal 6:

$$q_k = 0,8 \ s_k = 0,8 * 5,5 = 4,4 \frac{kN}{m^2}$$

En ambos casos, la sobrecarga de nieve es menor que la sobrecarga de uso por lo que, como estas no pueden ser concomitantes, no se tendrá en cuenta el efecto de esta.

5.2. Combinaciones de carga

Con los casos individuales, se definen las combinaciones de carga; cada combinación se hace por duplicado, para los estados límites últimos (con los coeficientes de mayoración correspondientes según *Norma IAP-11*) que sirven para comprobar la resistencia, y para los estados límites de servicio (con los coeficientes de mayoración a 1).

El valor de los factores de simultaneidad utilizados para las combinaciones de carga será diferente según la acción de que se trate. Se adoptarán los recogidos en la *Tabla 2*.

Tabla 2 - **FACTORES DE SIMULTANEIDAD**

ACCIÓN		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Sobrecarga de uso	en pasarelas	0,4	0,4	0
Viento	en situación persistente	0,6	0,2	0
Acción térmica		0,6	0,6	0,5

5.2.1. Estados límite de servicio (ELS)

Para las comprobaciones en estado límite de servicio, se adoptarán los valores de los coeficientes parciales indicados en la *Tabla 3*.

Tabla 3 - **COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES (ELS)**

ACCIÓN		EFFECTO DESFAVORABLE
Permanente de valor constante	Peso propio	1,0
Permanente de valor no constante	Pretensado P_1	1,05
Variable	Sobrecarga de uso	1,0
	Acciones climáticas (*)	1,0

(*) Por acciones climáticas se entiende la acción térmica y el viento.

Tabla 4 - **COMBINACIÓN DE CARGAS ELS**

Hipótesis	Peso propio	Pretensado	Barandilla	Sobrecarga de uso completa	Sobrecarga de uso parcial	Viento en +X	Viento en +Y	Viento en -Y
CO1	1,0	1,05	1,0					
CO2	1,0	1,05	1,0	1,0				
CO3	1,0	1,05	1,0		1,0			
CO4	1,0	1,05	1,0			1,0		
CO5	1,0	1,05	1,0				1,0	
CO6	1,0	1,05	1,0					1,0
CO7	1,0	1,05	1,0	1,0		0,6		
CO8	1,0	1,05	1,0	1,0			0,6	
CO9	1,0	1,05	1,0	1,0				0,6
CO10	1,0	1,05	1,0		1,0	0,6		
CO11	1,0	1,05	1,0		1,0		0,6	
CO12	1,0	1,05	1,0		1,0			0,6

Tabla 5 - **COMBINACIÓN DE CARGAS ELS PARA LA TEMPERATURA**

Hipótesis	Peso propio	Pretensado	Barandilla	Temperatura
CO1	1,0	1,05	1,0	
CO2	1,0	1,05	1,0	1,0

5.2.2. Estados límite últimos (ELU)

En situación persistente o transitoria para las comprobaciones resistentes se adoptan los valores de los coeficientes parciales desfavorables propios de cada carga indicados en la *Tabla 6*.

Tabla 6 - **COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS COMPROBACIONES RESISTENTES**

ACCIÓN		EFFECTO DESFAVORABLE
Permanente de valor constante	Peso propio	1,35
Permanente de valor no constante	Pretensado P_f	1,0
Variable	Sobrecarga de uso	1,35
	Acciones climáticas (*)	1,5

(*) Por acciones climáticas se entiende la acción térmica y el viento.

Tabla 7 - **COMBINACIÓN DE CARGAS ELU**

Hipótesis	Peso propio	Pretensado	Barandilla	Sobrecarga de uso completa	Sobrecarga de uso parcial	Viento en +X	Viento en +Y	Viento en -Y
CO13	1,35	1,0	1,35					
CO14	1,35	1,0	1,35	1,5				
CO15	1,35	1,0	1,35		1,5			
CO16	1,35	1,0	1,35			1,5		
CO17	1,35	1,0	1,35				1,5	
CO18	1,35	1,0	1,35					1,5
CO19	1,35	1,0	1,35	1,5		0,9		
CO20	1,35	1,0	1,35	1,5			0,9	
CO21	1,35	1,0	1,35	1,5				0,9
CO22	1,35	1,0	1,35		1,5	0,9		
CO23	1,35	1,0	1,35		1,5		0,9	
CO24	1,35	1,0	1,35		1,5			0,9

6. RESULTADOS

6.1. Resultados de las combinaciones de cargas ELS

El objetivo principal es obtener una flecha prácticamente nula para la combinación de las cargas permanentes (peso propio, pretensado y el efecto de la barandilla).

En este tipo de estructuras atirantadas se suele intentar que la pasarela quede un poco inclinada hacia arriba en el extremo del voladizo, de este modo se evita el efecto óptico de “caída” que puede provocar en el turista si la estructura está ligeramente inclinada hacia abajo.

Para ello se van dando valores de pretensado inicial a los tirantes, y se modifican hasta conseguir el resultado buscado. Los desplazamientos verticales de cada combinación de carga que se detallan en la *Tabla 8* son para los valores de pretensado detallados en el apartado 5.1.3. *Pretensado (CC3)*.

Tabla 8 – Desplazamientos u_z del mirador

Hipótesis	Contraflecha (mm)	Flecha máxima (mm)
CO1	+214,2	
CO2		-53,7
CO3	+165,5	
CO4	+219,1	
CO5	+192,3	
CO6	+236,5	
CO7		-55,1
CO8		-62,1
CO9		-45,5
CO10	+168,7	
CO11	+152,4	
CO12	+178,9	

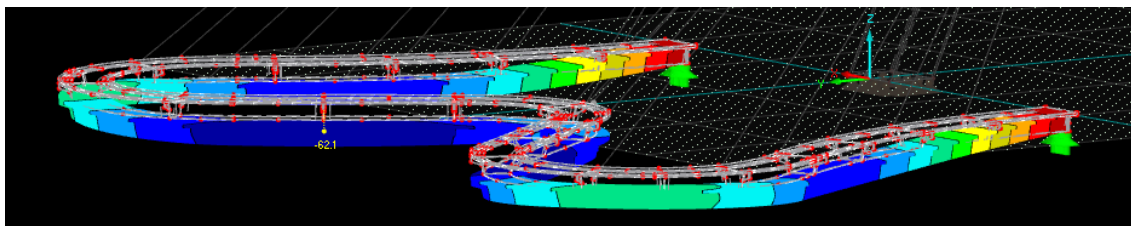


Figura 14 – Flecha máxima

Tabla 9 – Desplazamientos u_x del mirador debido a la temperatura

Hipótesis	U_x (mm)
CO1	-234,9
CO2	-225,7
ΔU_x	9,2

El desplazamiento provocado por el efecto de la temperatura es tan pequeño que puede ser absorbido por cualquier neopreno.

6.2. Resultados de las combinaciones de cargas ELU

Las combinaciones de carga de los estados límites últimos proporcionan la tensión máxima de Von Mises a la que está sometida el material. En la *Tabla 10* se recogen los valores máximos en MPa para cada combinación de carga.

Tabla 10 – Tensión máxima de Von Mises

Hipótesis (ELU)	Laterales exteriores (MPa)	Laterales interiores (MPa)	Base (MPa)	Diafragma (MPa)	Valor máximo admisible
CO13	152,6	285,5	246,0	154,1	≤ 400 MPa
CO14	221,6	377,0	375,9	223,5	
CO15	193,1	263,6	217,8	237,5	
CO16	152,9	276,1	169,6	364,9	
CO17	145,2	276,9	239,0	149,4	
CO18	159,2	293,7	253,0	158,4	
CO19	324,2	384,3	250,7	350,1	
CO20	217,2	370,8	317,7	219,9	
CO21	225,4	382,3	380,2	226,2	
CO22	272,1	357,1	217,6	266,6	
CO23	188,6	343,6	212,6	234,8	
CO24	198,2	355,1	222,2	240,1	

Tabla 11 – Tensión máxima de Von Mises en los rigidizadores

Hipótesis	Rigidizadores longitudinales (MPa)	Rigidizadores verticales (UPN 300) (MPa)	Marco rígido (UPN 300) (MPa)	Valor máximo admisible
CO13	204,4	257,4	55,1	≤ 400 MPa
CO14	290,6	386,7	71,0	
CO15	267,7	301,7	60,8	
CO16	215,6	372,4	99,6	
CO17	195,0	249,1	53,7	
CO18	212,4	264,9	56,0	
CO19	296,7	354,2	97,7	
CO20	285,1	380,7	70,0	
CO21	295,4	391,3	71,6	
CO22	275,0	288,6	86,8	
CO23	262,1	300,7	61,2	
CO24	272,5	303,3	60,4	

Tabla 12 – Tensiones máximas de compresión en el mástil

Hipótesis	σ_z (MPa)	Valor máximo admisible
CO13	21,1	$\leq 24,66$ MPa
CO14	23,3	
CO15	23,3	
CO16	24,1	
CO17	16,1	
CO18	21,2	
CO19	23,4	
CO20	24,1	
CO21	22,5	
CO22	21,9	
CO23	22,6	
CO24	21,1	

Tabla 13 – Esfuerzos axiles en los tirantes

Hipótesis	Esfuerzo Axil máximo (kN)	Valor máximo admisible
CO13	1120,16	≤ 5008 kN
CO14	1494,85	
CO15	1505,26	
CO16	1125,26	
CO17	1119,81	
CO18	1120,83	
CO19	1497,66	
CO20	1495,28	
CO21	1493,80	
CO22	1502,44	
CO23	1505,73	
CO24	1504,21	

7. CONCLUSIONES

A efectos de este Trabajo de Fin de Grado se puede concluir que todos los elementos que conforman el mirador de estructura mixta de acero-hormigón en voladizo atirantado a un mástil de hormigón armado cumplen con los requisitos de resistencia y de servicio que dicta la norma presentando valores de tensiones y deformaciones inferiores a los admisibles.

Se observa también que con el pretensado se da una contraflecha importante de manera que, cuando la estructura entra en carga, casi siempre queda por encima de la horizontal. Es en las hipótesis en las que actúa la sobrecarga de uso total como predominante en las que hay flecha, siendo el valor máximo de esta de -62,1 milímetros que, para los 40 metros de voladizo que tiene el mirador, supone una pendiente de $62,1 \cdot 100 / 40000 = 0,15\%$ por lo que puede asumirse que permanece horizontal para estas combinaciones de carga.

Los esfuerzos axiales a los que están sometidos los cables de pretensado son casi 5 veces menores del valor máximo admisible que pueden soportar.

En cuanto al hormigón del mástil, se ha hecho una comprobación tensional como primera aproximación. Aunque en realidad lo que habría que hacer es calcular las armaduras necesarias para los esfuerzos máximos, no se ha podido realizar porque la asignatura de hormigón armado no entra dentro del plan de estudios en la titulación del Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales.

De los resultados obtenidos en las tensiones máximas de Von Mises, todos los componentes de acero están sometidos a tensiones inferiores al valor admisible del material. No obstante, hay que destacar que donde mayores valores se dan es en las zonas de intersección de elementos como los laterales con la base, el diafragma y los rigizadores verticales de estos. Para un estudio más detallado habría que realizar un modelo más fino en esa zona.

Por último, incidir en que habría que tener en cuenta un análisis de vibraciones, pero debido al tamaño del modelo y las dificultades de cálculo se ha considerado que queda fuera del alcance del proyecto.

ANEXOS

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Hormigón C30/37

El hormigón armado será utilizado en la losa dispuesta sobre la viga cajón.

Este material, aparte de presentar gran durabilidad, destaca principalmente por su elevada resistencia a esfuerzos de compresión (30 MPa). Es por ello por lo que se ha escogido también para la construcción del mástil, ya que así ayuda a contrarrestar las cargas de tracción procedentes de los tirantes.

En la *Figura 15*, extraída del apartado de materiales en el programa Dlubal, se muestran los valores de algunas de las constantes que presenta.

The screenshot shows a software interface for defining material properties. At the top, there are fields for 'Núm.' (3), 'Color' (a grey swatch), and 'Descripción' (Hormigón C30/37). Below this is a section titled 'Constantes del material' containing several input fields with their respective units: 'Módulo de elasticidad' (E: 3300.00 [kN/cm²]), 'Módulo de cortante' (G: 1375.00 [kN/cm²]), 'Coeficiente de Poisson' (ν: 0.200 [-]), 'Peso específico' (γ: 25.00 [kN/m³]), 'Coeficiente de dilatación térmica' (α: 1.0000E-05 [1/°C]), and 'Coeficiente parcial de seguridad' (γ_M: 1.00 [-]). At the bottom, there is a 'Modelo de material' dropdown menu set to 'Isótropo elástico lineal'.

Constante	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad (E)	3300.00	[kN/cm²]
Módulo de cortante (G)	1375.00	[kN/cm²]
Coeficiente de Poisson (ν)	0.200	[-]
Peso específico (γ)	25.00	[kN/m³]
Coeficiente de dilatación térmica (α)	1.0000E-05	[1/°C]
Coeficiente parcial de seguridad (γ _M)	1.00	[-]

Figura 15 - Constantes del hormigón C30/37

Acero S 420 N

Este material pertenece a los aceros soldables de grano fino, en la condición de normalizado.

Según la instrucción de acero estructural, presenta un límite elástico de 420 N/mm² y una resistencia a tracción entre 520 y 680 N/mm² para espesores nominales menores o iguales a 40 milímetros.

Otras características propias se recogen en la *Figura 16*.

The screenshot shows a software interface for defining material properties. At the top, there are fields for 'Núm.' (1), 'Color' (a blue swatch), and 'Descripción' (Acero S 420 N). Below this is a section titled 'Constantes del material' containing several input fields with their respective units: 'Módulo de elasticidad' (E: 21000.00 [kN/cm²]), 'Módulo de cortante' (G: 8076.92 [kN/cm²]), 'Coeficiente de Poisson' (ν: 0.300 [-]), 'Peso específico' (γ: 78.50 [kN/m³]), 'Coeficiente de dilatación térmica' (α: 1.2000E-05 [1/°C]), and 'Coeficiente parcial de seguridad' (γ_M: 1.00 [-]). At the bottom, there is a 'Modelo de material' dropdown menu set to 'Isótropo elástico lineal'.

Constante	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad (E)	21000.00	[kN/cm²]
Módulo de cortante (G)	8076.92	[kN/cm²]
Coeficiente de Poisson (ν)	0.300	[-]
Peso específico (γ)	78.50	[kN/m³]
Coeficiente de dilatación térmica (α)	1.2000E-05	[1/°C]
Coeficiente parcial de seguridad (γ _M)	1.00	[-]

Figura 16 - Constantes del acero S 420 N

Cable de pretensar St 1600/1860

Será utilizado en los tirantes; tiene un límite elástico de 1860 MPa. En la *Figura 17* se detalla el valor de las constantes del material.

Constantes del material		
Módulo de elasticidad	E :	19500.00 [kN/cm ²]
Módulo de cortante	G :	7500.00 [kN/cm ²]
Coefficiente de Poisson	ν :	0.300 [-]
Peso específico	γ :	78.50 [kN/m ³]
Coefficiente de dilatación térmica	α :	1.0000E-05 [1/°C]
Coefficiente parcial de seguridad	γ_M :	1.00 [-]

Modelo de material	
Isótropo elástico lineal	

Figura 17 – Constantes del cable de pretensar St 1600/1860

CONFIGURACIÓN DE LA MALLA DE EF

La malla de EF se ha definido de acuerdo con los siguientes parámetros (Figura 18):

- l_{EF} (longitud de destino de elementos finitos): 0,65 metros.
- ε (distancia máxima entre un nudo y una línea para integrarla dentro de la línea): 0,001 metros.
- Número máximo de nudos de malla: 650.000
- En barras:
 - Número de divisiones para tipos especiales de barras (cables, apoyo elástico, sección variable, no linealidad): 10
- En superficies:
 - Δ_D (razón máxima de diagonales de rectángulos de elementos finitos): 1,80
 - α (inclinación máxima fuera del plano de un elemento cuadrangular simple): $0,50^\circ$
 - Forma de elementos finitos: triangulares y cuadrangulares.
- En sólidos:
 - Refinamiento de malla de elementos finitos en sólidos que contengan nudos próximos.
 - Número máximo de elementos: 650.000

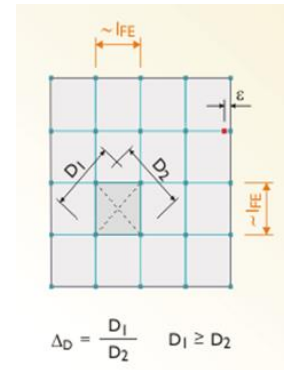


Figura 18 - Parámetros de malla

De esta manera, la malla se compone de:

- 1.268.375 EF de sólidos 3D
- 265.534 EF de superficies 2D
- 20 EF de barras 1D
- 386.735 número de nudos
- 2.320.518 número de ecuaciones

La calidad de la malla es un 99,6% aceptable.

MÉTODO DE CÁLCULO

Método de Elementos Finitos

Las características estructurales de la construcción objeto de estudio serán analizadas según el método de elementos finitos.

El método de elementos finitos (MEF) es un método de cálculo utilizado en diversos problemas de ingeniería, que se basa en considerar la estructura dividida en elementos discretos, con determinadas condiciones de vínculo entre sí, generando un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente y proporciona el estado de tensiones y deformaciones.

Programa de cálculo RFEM 5

En el desarrollo de este proyecto se ha utilizado el programa de análisis estructural por elementos finitos RFEM que permite modelar, calcular y dimensionar modelos estructurales 2D y 3D compuestos de elementos tipo barra, placas, muros, láminas y sólidos. RFEM proporciona deformaciones, esfuerzos internos, esfuerzos en los apoyos y tensiones de contacto del suelo.

Para la combinación de cargas y resultados, el método de análisis que aplicará será un análisis geoméricamente lineal y para la resolución de ecuaciones algebraicas no lineales el método de Newton-Raphson.

CÁLCULO DE LAS ACCIONES VARIABLES

Temperatura

Para verificar que los neoprenos absorben las dilataciones provocadas por el efecto de la temperatura, se permite el desplazamiento sobre el eje X en uno de los apoyos de la viga cajón. Se calculan dos hipótesis de ELS, una con las dos cargas de permanente y pretensado y otra combinando esta con la temperatura; el efecto de la temperatura sobre la estructura será la diferencia entre ambos desplazamientos.

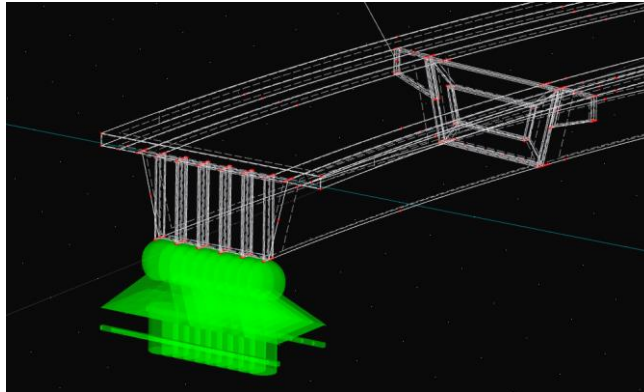


Figura 19 – Apoyo con desplazamiento en u_x

Viento

La acción del viento o presión estática puede expresarse como:

$$q_e = q_b * c_e * c_p$$

Ec. 1 – Acción del viento

siendo:

- q_b presión dinámica del viento, que de forma simplificada puede adoptarse el valor de $0,5 \text{ kN/m}^2$ para cualquier punto del territorio español
- c_e coeficiente de exposición, variable con la altura, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción. Puede tomarse un valor constante de $2,0$ independientemente de la altura.
- c_p coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento. Su valor dependiente de la esbeltez se recoge en la Figura 16.

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	$\geq 5,00$
Coeficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Figura 20 – Coeficientes eólicos (extraído del CTE)

La presión estática en función del coeficiente eólico será:

$$q_e = q_b * c_e * c_p = 0,5 \frac{kN}{m^2} * 2 * c_p = 1 \frac{kN}{m^2} * c_p$$

- Laterales del cajón: la esbeltez en el plano perpendicular al viento es de 1 metro por lo que el coeficiente eólico de presión y de succión será 0,8 y 0,5 respectivamente.

Tabla 14 – CARGAS DE VIENTO EN LOS LATERALES DEL CAJÓN

	Presión	Succión
q_e (kN/m ²)	0,8	0,5

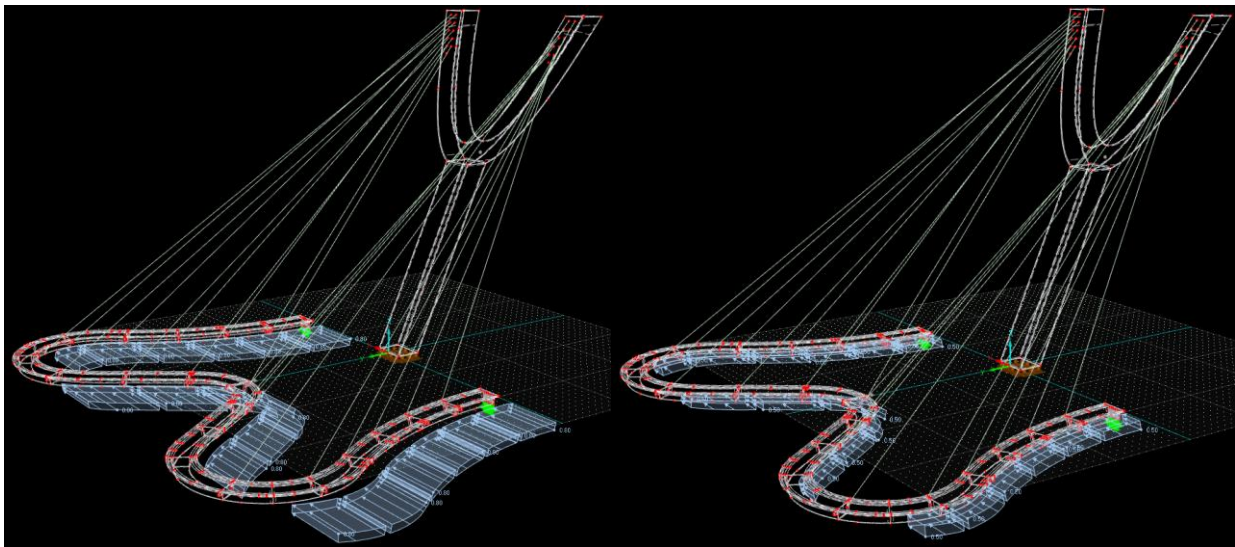


Figura 21 – Cargas de presión y succión en dirección +X en laterales del cajón

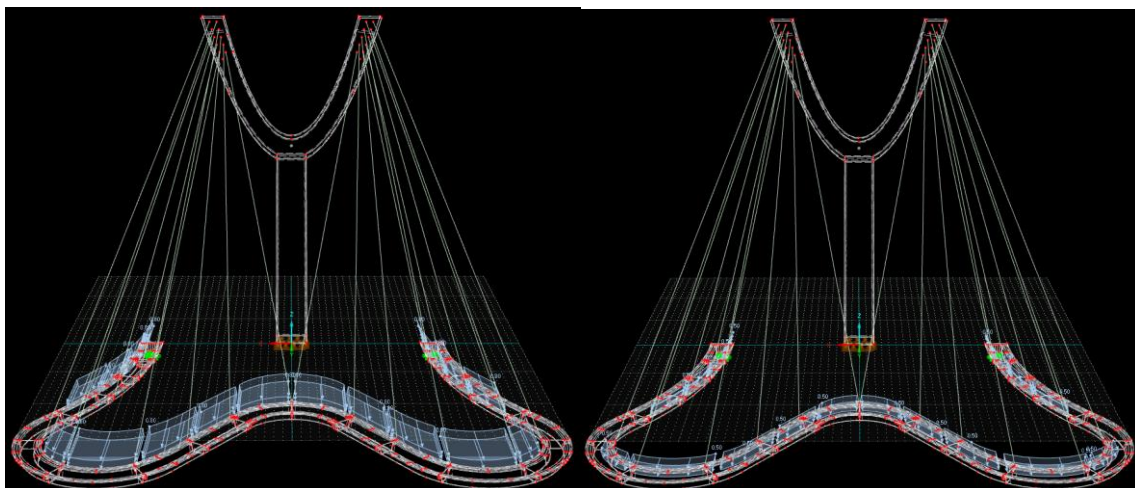


Figura 22 – Cargas de presión y succión en dirección +Y en laterales del cajón

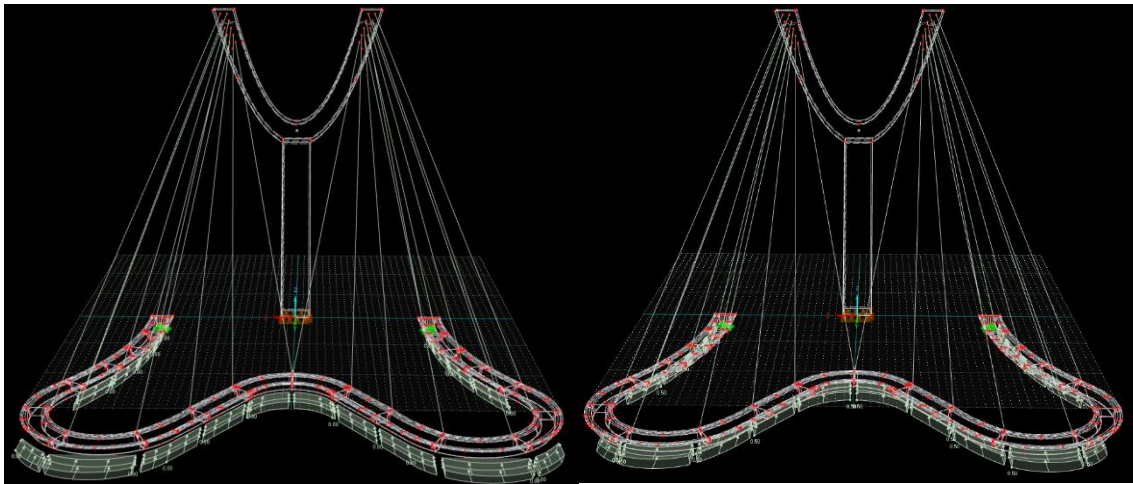


Figura 23 – Cargas de presión y succión en dirección -Y en laterales del cajón

- Tablero: con esbeltez de 0,15 m en la dirección perpendicular al viento, lo cual implica unos coeficientes de presión y succión de 0,7 y 0,3 respectivamente.

Tabla 15 – **CARGAS DE VIENTO EN EL TABLERO**

	Presión	Succión
q_e (kN/m²)	0,7	0,3

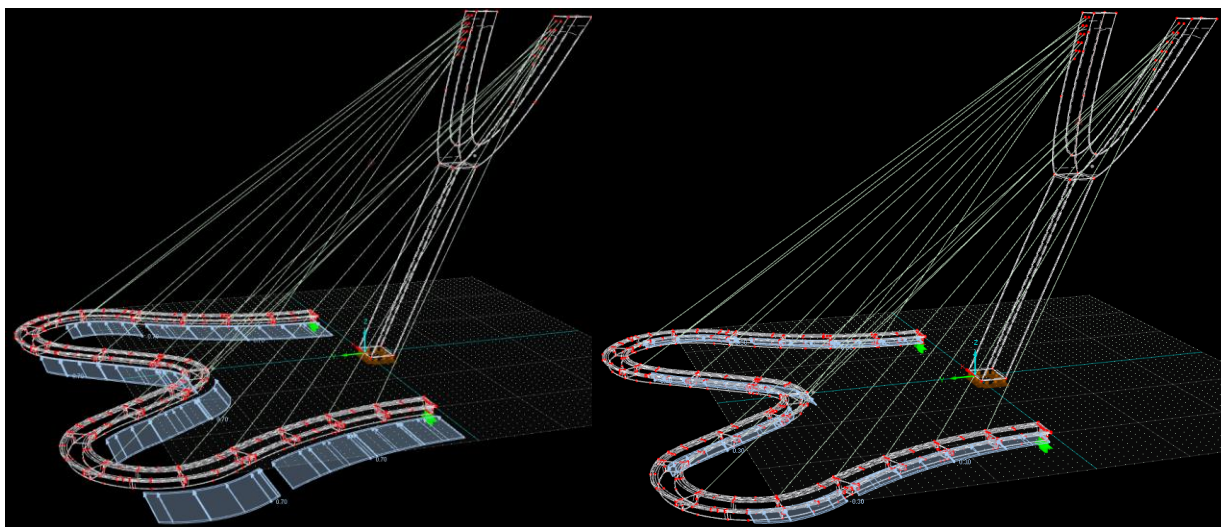


Figura 24 – Cargas de presión y succión en dirección +X en tablero

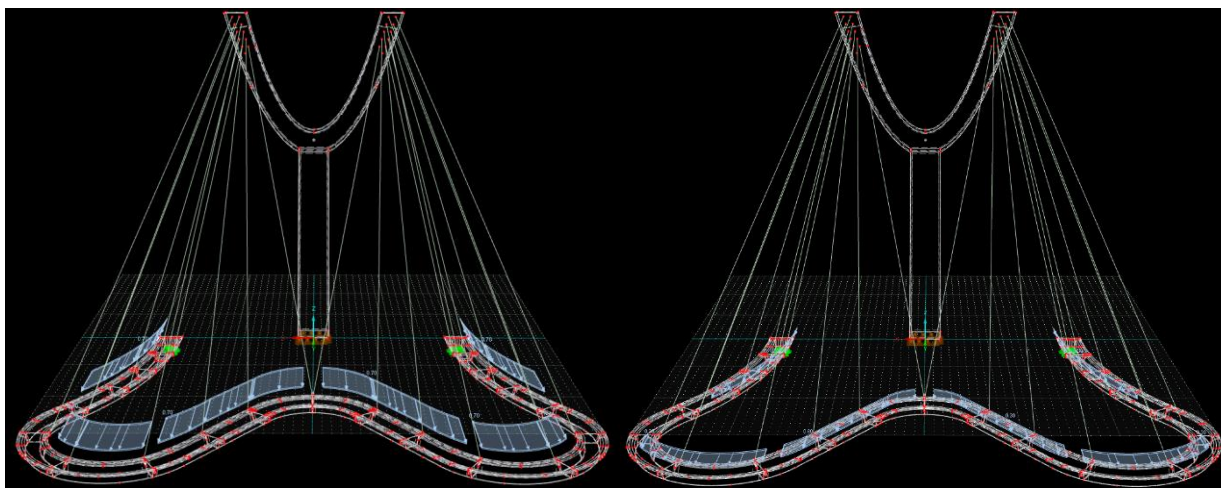


Figura 25 – Cargas de presión y succión en dirección +Y en tablero

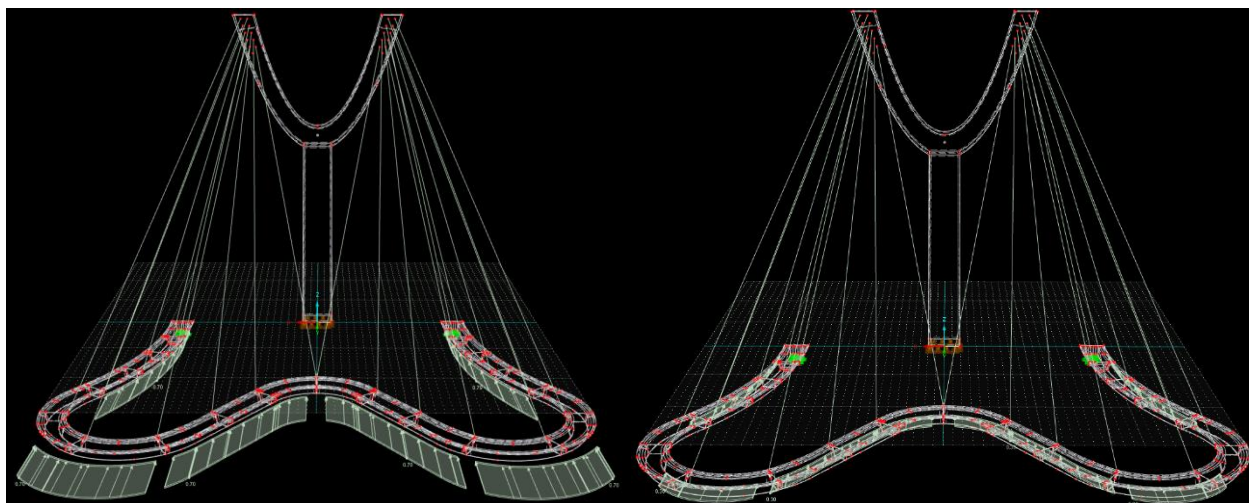


Figura 26 – Cargas de presión y succión en dirección -Y en tablero

- **Barandilla:** el efecto del viento sobre la barandilla se aplicará en el canto de la losa de hormigón. Para una barandilla estándar de 1,10 m de altura, se tomará como coeficientes eólicos de presión y succión de 0,8 y 0,6.

Tabla 16 – **CARGAS DE VIENTO EN LA BARANDILLA**

	Presión	Succión
q_e (kN/m²)	0,8	0,6

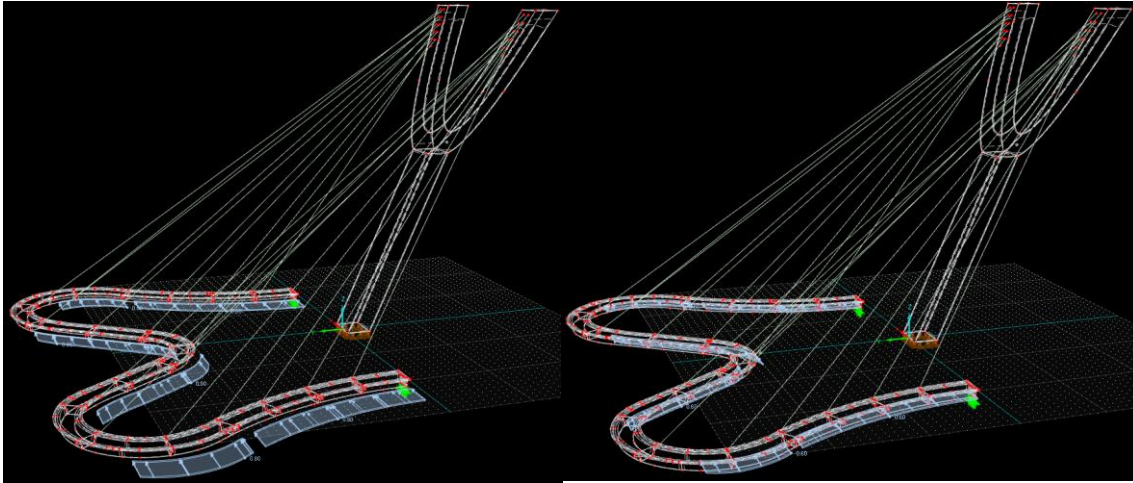


Figura 27 – Cargas de presión y succión en dirección +X debidas a la barandilla

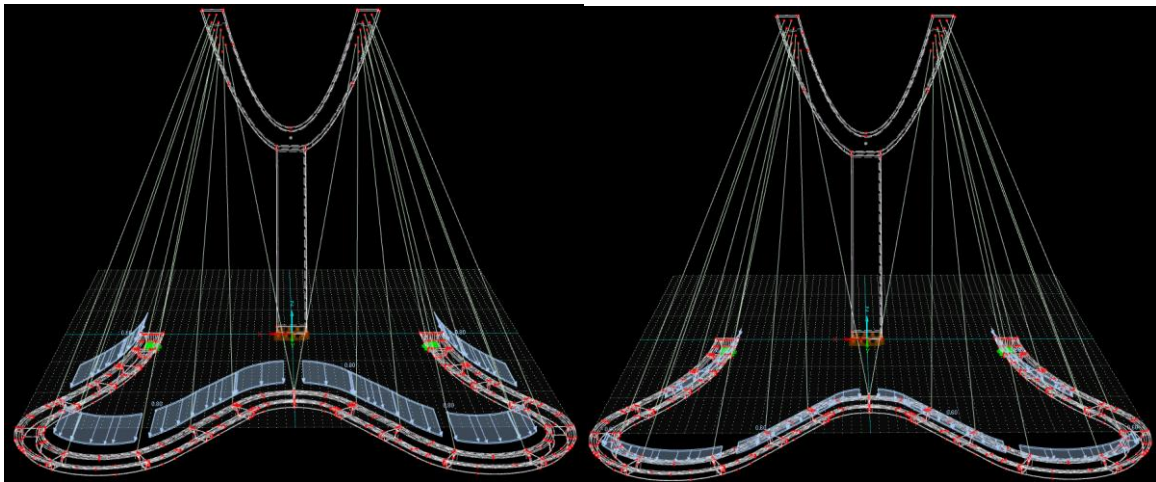


Figura 28 – Cargas de presión y succión en dirección +Y debidas a la barandilla

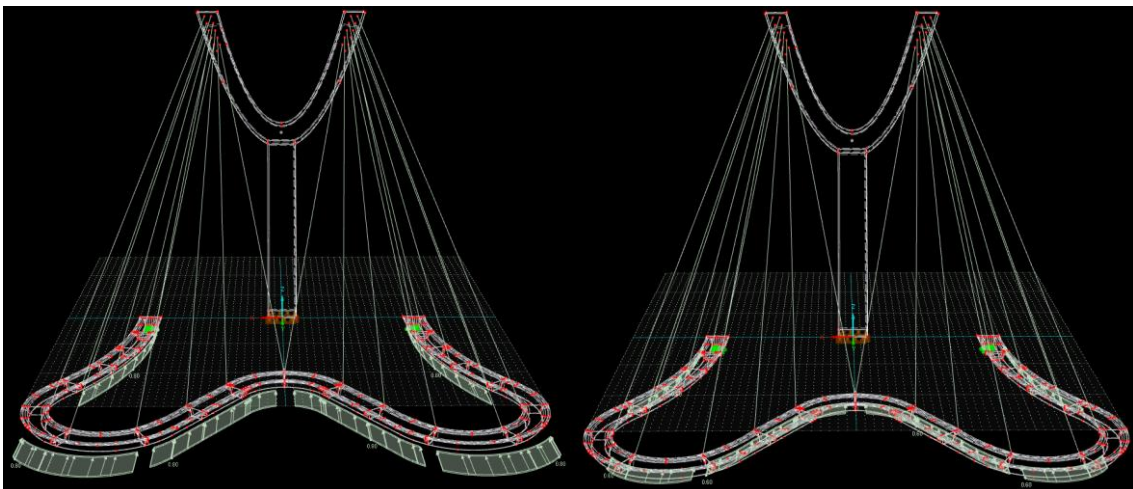


Figura 29 – Cargas de presión y succión en dirección -Y debidas a la barandilla

- Mástil: con una altura de 40,89 m, los coeficientes eólicos correspondientes son 0,8 en presión y 0,7 en succión.

Tabla 17 – CARGAS DE VIENTO EN EL MÁSTIL

	Presión	Succión
q_e (kN/m ²)	0,8	0,7

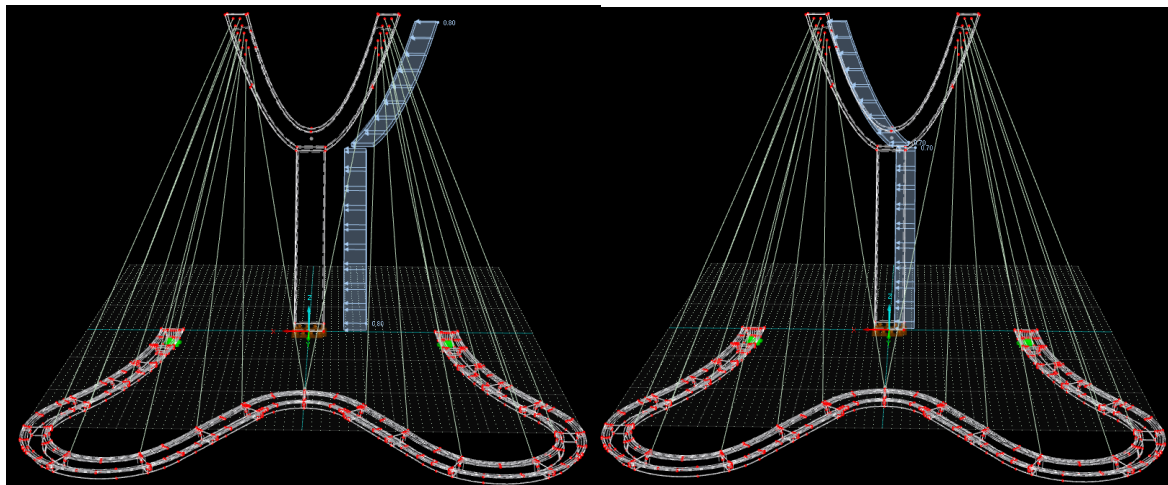


Figura 30 – Cargas de presión y succión en dirección +X en el mástil

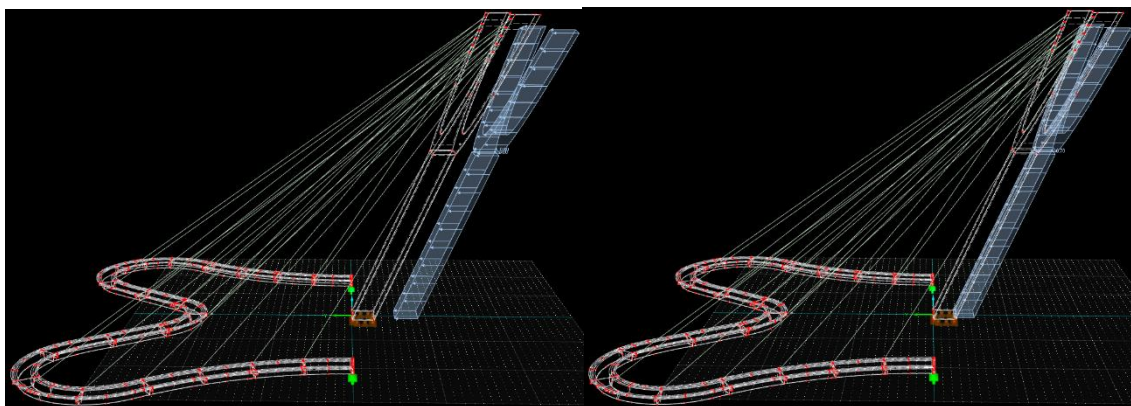


Figura 31 – Cargas de presión y succión en dirección +Y en el mástil

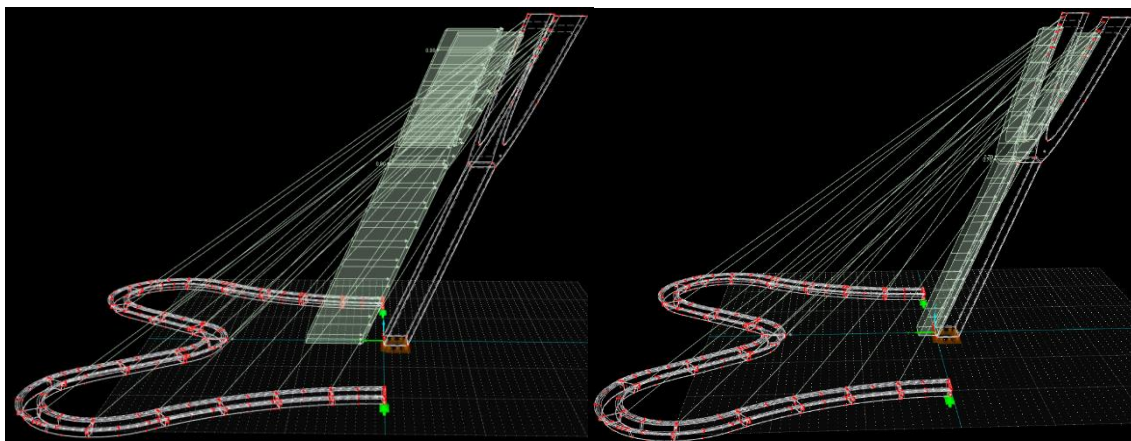


Figura 32 – Cargas de presión y succión en dirección -Y en el mástil

- Tirantes:

$$q_e = 0,5 \frac{kN}{m^2} * 2,0 * \pi * r * L$$

Ec. 2 – Acción del viento en los tirantes

$$\frac{q_e}{L} = 0,5 \frac{kN}{m^2} * 2,0 * \pi * 0,03m = 0,094 \frac{kN}{m}$$

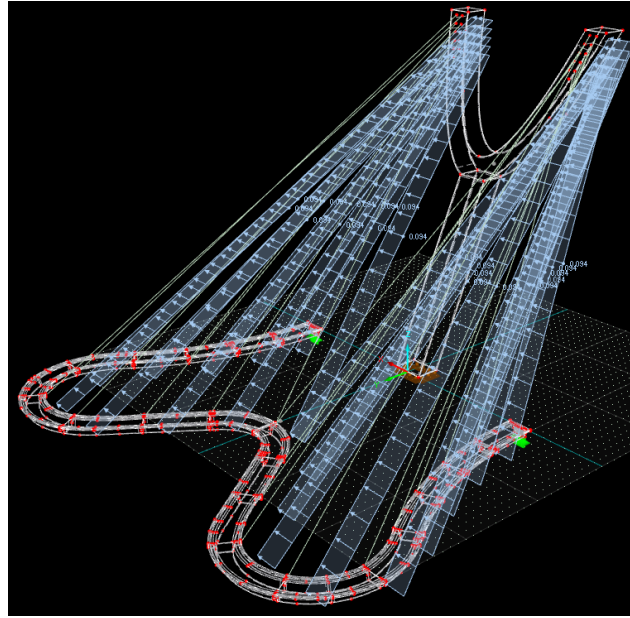


Figura 33 – Cargas viento en dirección +X en los tirantes

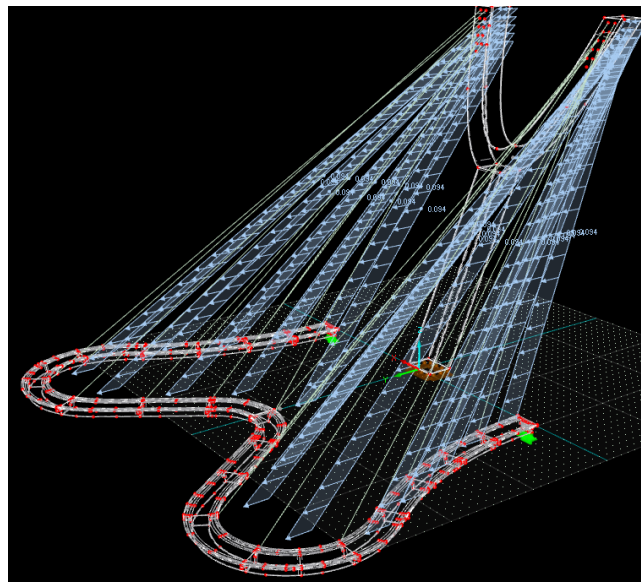


Figura 34 – Cargas viento en dirección +Y en los tirantes

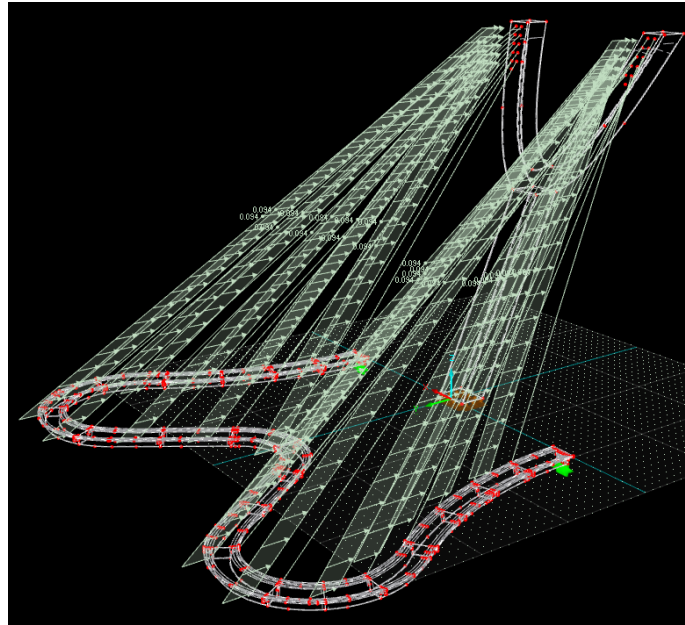


Figura 35 – Cargas viento en dirección -Y en los tirantes

Nieve

Como valor característico de la sobrecarga de nieve sobre tablero q_k , se adoptará el definido por la siguiente expresión según la norma IAP-11:

$$q_k = 0,8 s_k$$

Ec. 3 – Sobrecarga de nieve

Donde s_k es el valor característico de la sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal recogido en la *Figura 37*.



Figura 36 - Zonas climáticas de invierno (según Norma IAP-11 y CTE)

ZONA DE CLIMA INVERNAL (SEGÚN FIGURA 4.3-b)							
ALTITUD [M]	1	2	3	4	5	6	7
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2
900	1,4	1,3	0,6	1,0	0,8	0,9	0,2
1000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,8	3,3	0,2
1600	4,3	3,5	2,6	4,6	2,5	5,5	0,2
1800	-	4,6	4,0	-	-	9,3	0,2
2200	-	8,0	-	-	-	-	-

Figura 37 - Sobrecarga de nieve (según norma IAP-11 y CTE)

COEFICIENTES DE COMBINACIÓN DE CARGAS

El valor de los factores de simultaneidad ψ será diferente según la acción de que se trate. Según la Norma IAP-11 se adoptarán los valores recogidos en la *Figura 38*.

ACCIÓN			ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga de uso	gr 1, Cargas verticales	Vehículos pesados	0,75	0,75	0
		Sobrecarga uniforme	0,4	0,4	0 / 0,2 ⁽¹⁾
		Carga en aceras	0,4	0,4	0
	gr 2, Fuerzas horizontales		0	0	0
	gr 3, Peatones		0	0	0
	gr 4, Aglomeraciones		0	0	0
	Sobrecarga de uso en pasarelas		0,4	0,4	0
Viento	F_{wk}	En situación persistente	0,6	0,2	0
		En construcción	0,8	0	0
		En pasarelas	0,3	0,2	0
Acción térmica	T_k		0,6	0,6	0,5
Nieve	$Q_{Sn,k}$	En construcción	0,8	0	0
Acción del agua	W_k	Empuje hidrostático	1,0	1,0	1,0
		Empuje hidrodinámico	1,0	1,0	1,0
Sobrecargas de construcción	Q_c		1,0	0	1,0

Figura 38 - Factores de simultaneidad ψ

Para la comprobación de los estados límite últimos (ELU) se tendrán en cuenta los coeficientes parciales de la *Figura 39* y de acuerdo con la siguiente expresión (*Ec. 4*), ambas extraídas de la Norma IAP-11.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Ec. 4 - Combinación fundamental para comprobaciones en ELU

ACCIÓN		EFECTO	
		FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,35
	Carga muerta	1,0	1,35
Permanente de valor no constante (G*)	Pretensado P ₁	1,0	1,0 / 1,2 ⁽¹⁾ / 1,3 ⁽²⁾
	Pretensado P ₂	1,0	1,35
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,35
	Empuje del terreno	1,0	1,5
	Asientos	0	1,2 / 1,35 ⁽³⁾
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,35
Variable (Q)	Sobrecarga de uso	0	1,35
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,5
	Acciones climáticas	0	1,5
	Empuje hidrostático	0	1,5
	Empuje hidrodinámico	0	1,5
	Sobrecargas de construcción	0	1,35

Figura 39 - Coeficientes parciales para las acciones (ELU)

Para la comprobación de los estados límite de servicio (ELS) se tendrán en cuenta los coeficientes parciales de la *Figura 40* y de acuerdo con la siguiente expresión (*Ec. 5*), ambas extraídas de la Norma IAP-11.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Ec. 5 - Combinación fundamental para comprobaciones en ELS

ACCIÓN		EFECTO	
		FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,0
	Carga muerta	1,0	1,0
Permanente de valor no constante (G [*])	Pretensado P_1	0,9 ⁽¹⁾	1,1 ⁽¹⁾
	Pretensado P_2	1,0	1,0
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,0
	Empuje del terreno	1,0	1,0
	Asientos	0	1,0
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,0
Variable (Q)	Sobrecarga de uso	0	1,0
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,0
	Acciones climáticas	0	1,0
	Empuje hidrostático	0	1,0
	Empuje hidrodinámico	0	1,0
	Sobrecargas de construcción	0	1,0

(1) Para la acción del pretensado se tomarán los coeficientes que indique la EHE-08 o normativa que la sustituya. En la tabla figuran los valores que la EHE-08 recoge para el caso de estructuras postesas. En el caso de estructuras pretesas, los coeficientes parciales son 0,95 y 1,05 para efecto favorable y desfavorable, respectivamente.

Figura 40 - Coeficientes parciales para las acciones (ELS)

Al combinar las diferentes acciones variables, se tendrán en cuenta las siguientes hipótesis recogidas en la Norma IAP-11

- Cuando se considere la acción del viento como predominante, no se tendrá en cuenta la actuación de la sobrecarga de uso.
- Cuando se considere la sobrecarga de uso como predominante, se considerará el viento concomitante correspondiente.

VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE TENSIONES

Hormigón

Según la instrucción EHE-08, se considerará como resistencia de cálculo del hormigón en compresión el valor:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Ec. 6 - Resistencia del hormigón a compresión

donde:

α_{cc} factor que tiene en cuenta el cansancio del hormigón. En esta instrucción se adopta, con carácter general, el valor $\alpha_{cc} = 1$.

f_{ck} resistencia característica de proyecto

γ_c coeficiente parcial de seguridad

Por lo tanto:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 * \frac{37 \text{ MPa}}{1,5} = 24,66 \text{ MPa}$$

Acero S 420 N

La tensión máxima admisible para este acero será:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma}{\gamma_M} = \frac{420 \text{ MPa}}{1,05} = 400 \text{ MPa}$$

Ec. 7 – Tensión máxima admisible del acero

El coeficiente parcial para la resistencia para los estados límite últimos es el detallado en la EAE.

Cable de pretensar St 1600/1860

El esfuerzo axil máximo que puede soportar cada tirante es:

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma * A}{\gamma_M} = \frac{1860 \text{ MPa} * \pi * (30\text{mm})^2}{1,05} = 5008,6 \text{ kN}$$

Ec. 8 – Esfuerzo axil máximo admisible de cada tirante

RESULTADOS DE DEFORMACIONES GLOBALES PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES DE CARGA

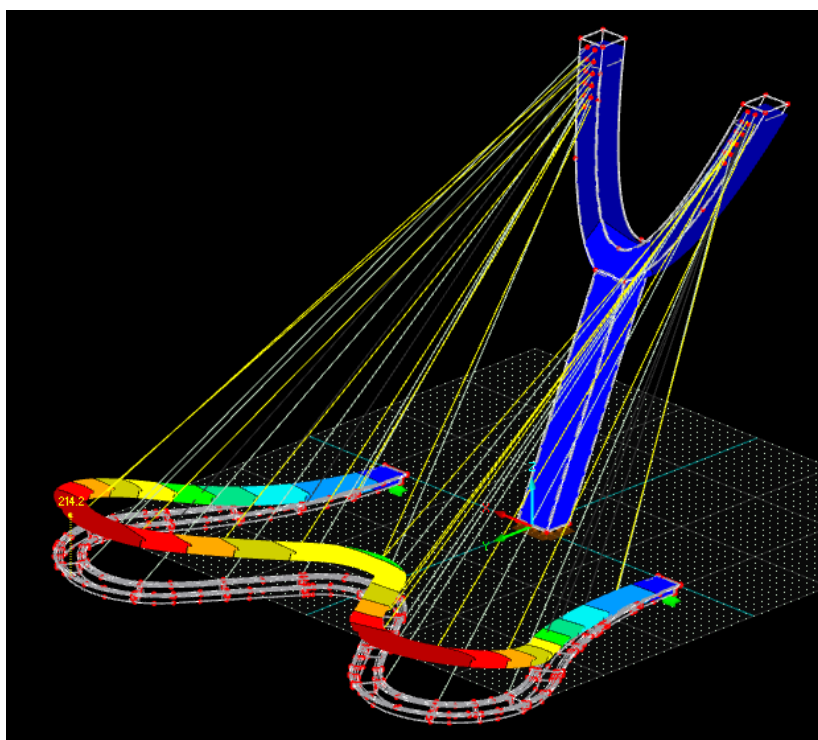


Figura 41 – Desplazamiento u_z para CO1

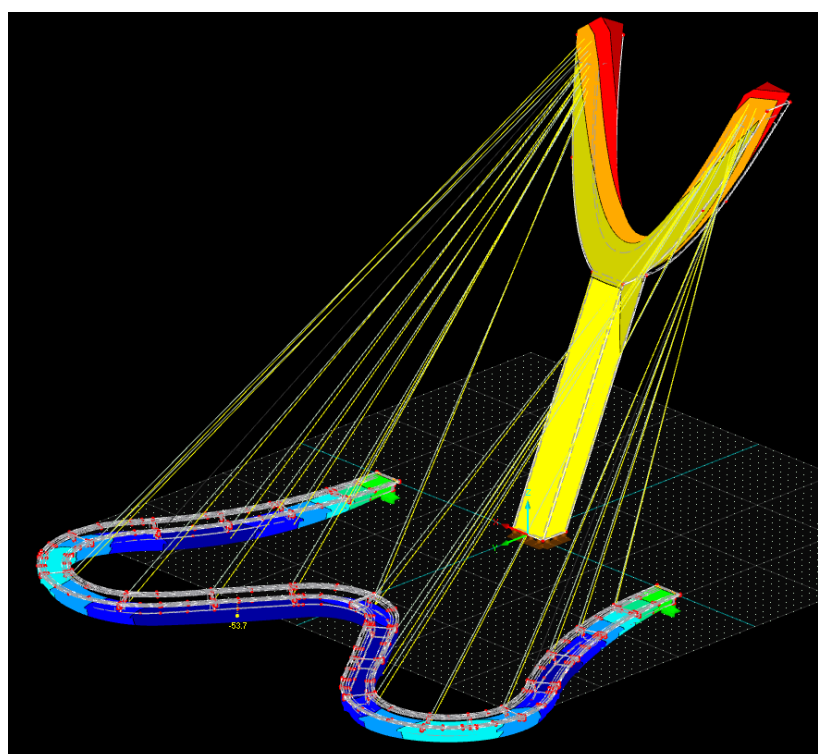


Figura 42 – Desplazamiento u_z para CO2

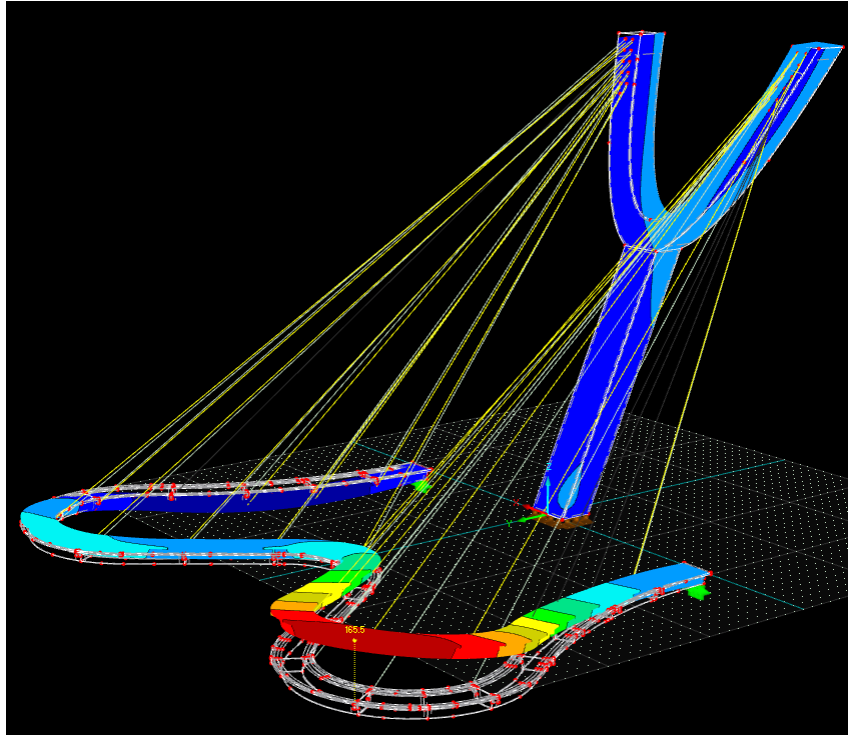


Figura 43 – Desplazamiento u_z para CO3

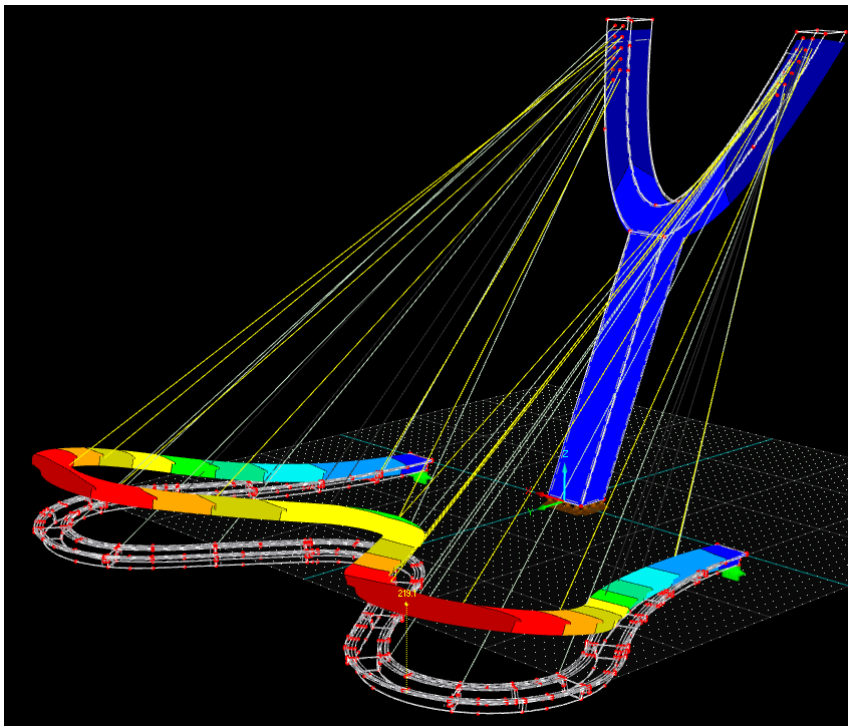


Figura 44 – Desplazamiento u_z para CO4

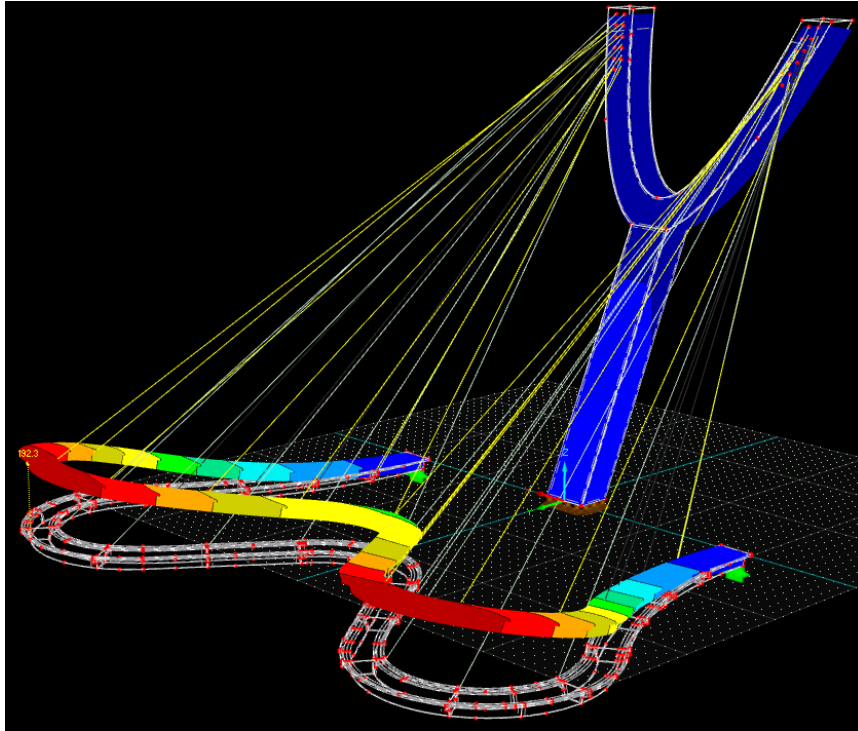


Figura 45 – Desplazamiento u_z para CO5

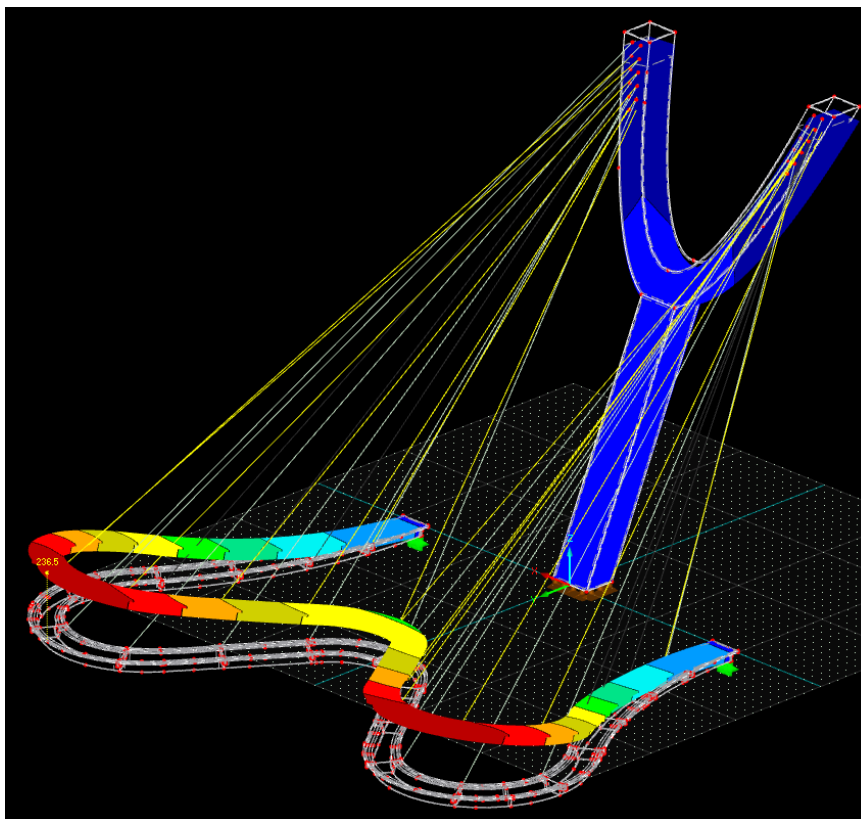


Figura 46 – Desplazamiento u_z para CO6

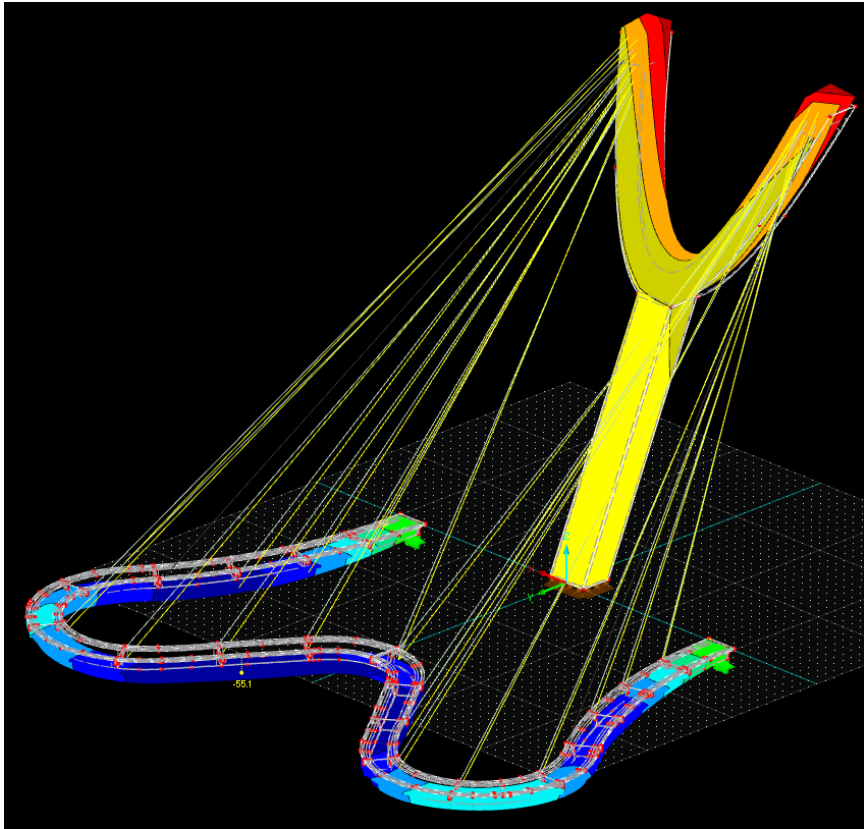


Figura 47 – Desplazamiento u_z para CO7

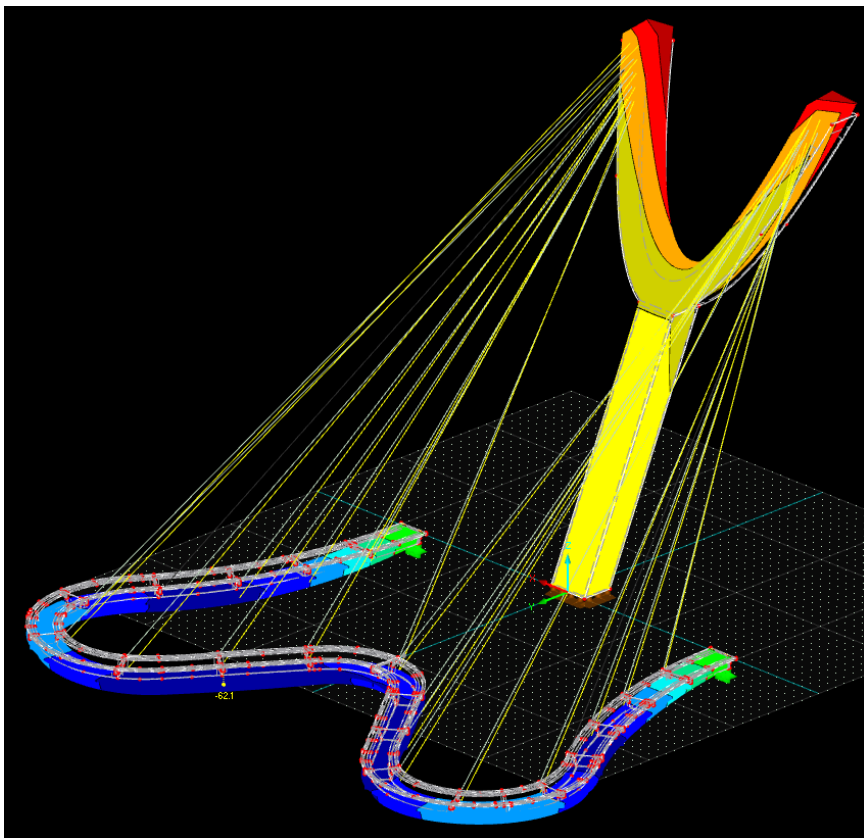


Figura 48 – Desplazamiento u_z para CO8

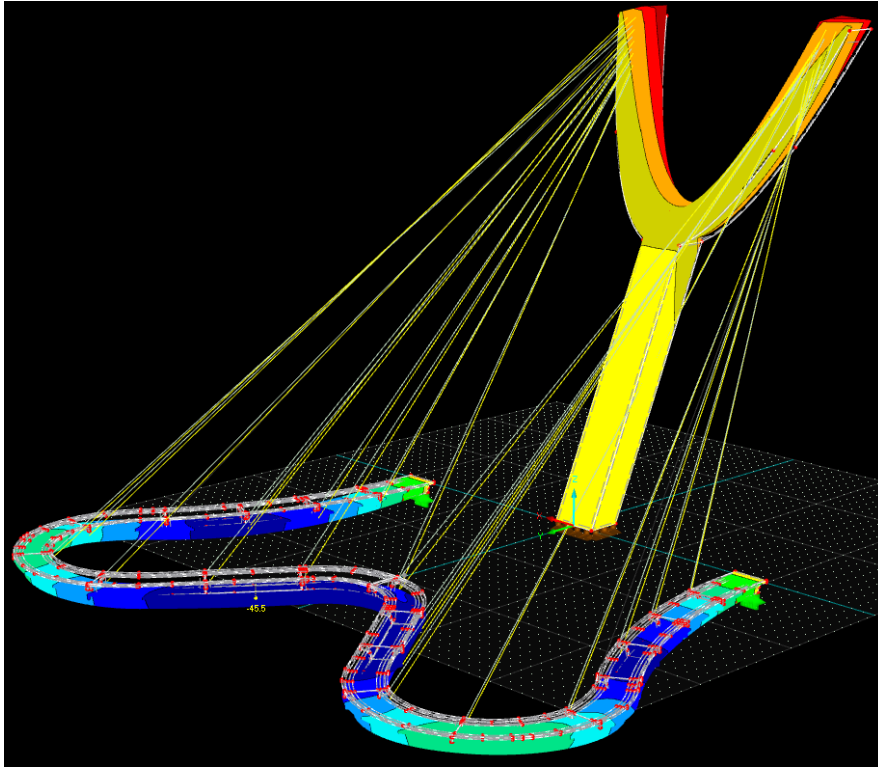


Figura 49 – Desplazamiento u_z para CO9

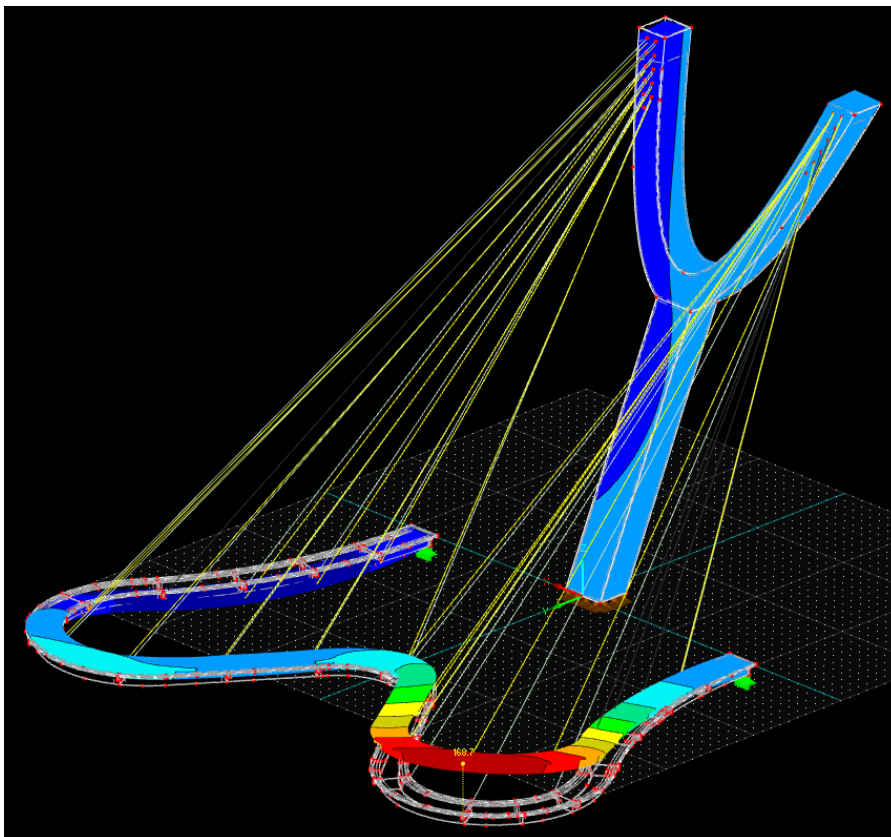


Figura 50 – Desplazamiento u_z para CO10

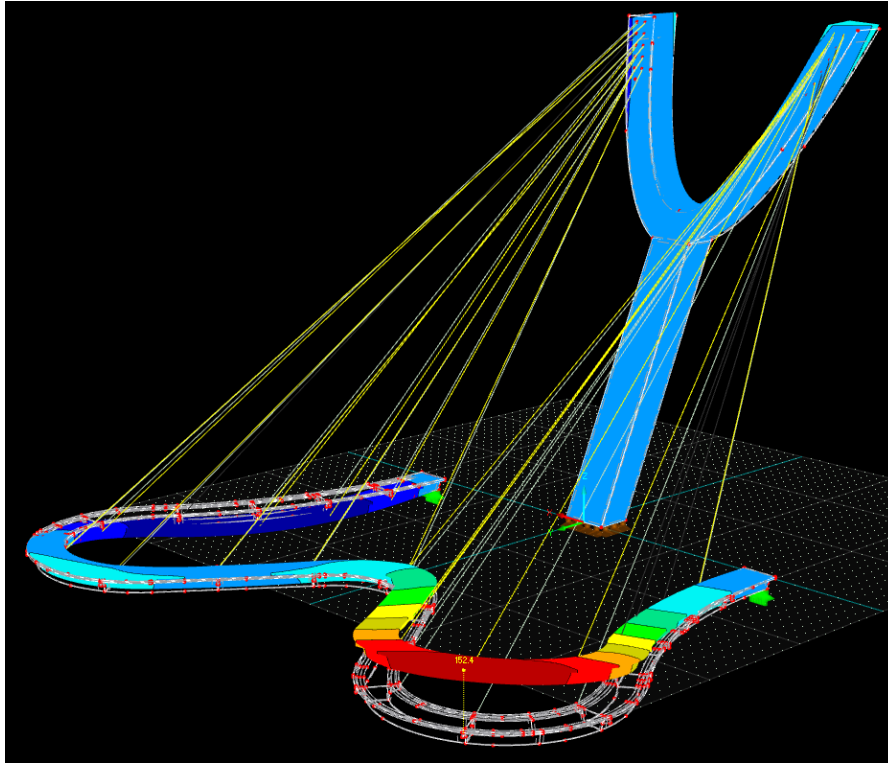


Figura 51 – Desplazamiento u_z para CO11

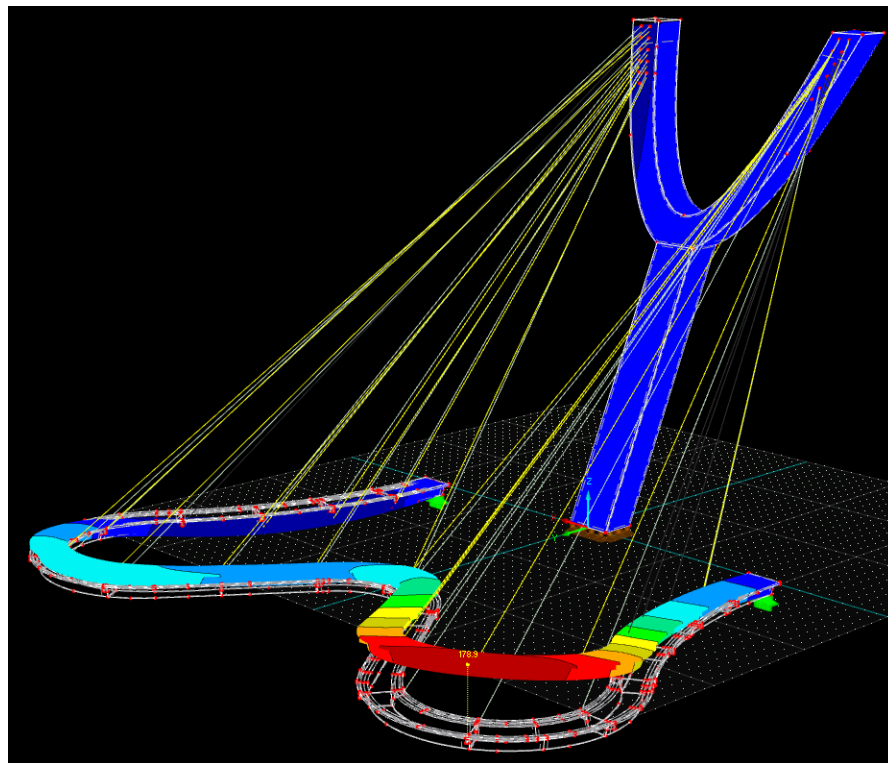


Figura 52 – Desplazamiento u_z para CO12

RESULTADOS DE TENSIONES MÁXIMAS PARA LAS DISTINTAS COMBINACIONES DE CARGA

En la *Figura 53* se indica el mapa de colores correspondiente a los valores de tensiones máximas de Von Mises para los elementos conformados en acero S 420.

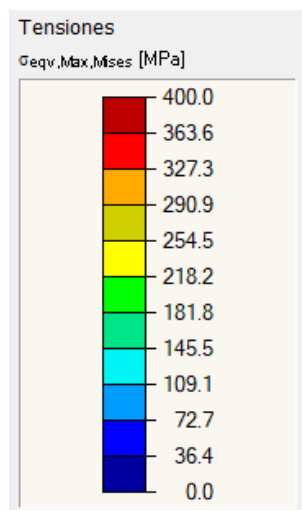


Figura 53 – Mapa de distribución de tensiones en superficies de acero S 420 N

Cajón metálico

- Laterales exteriores

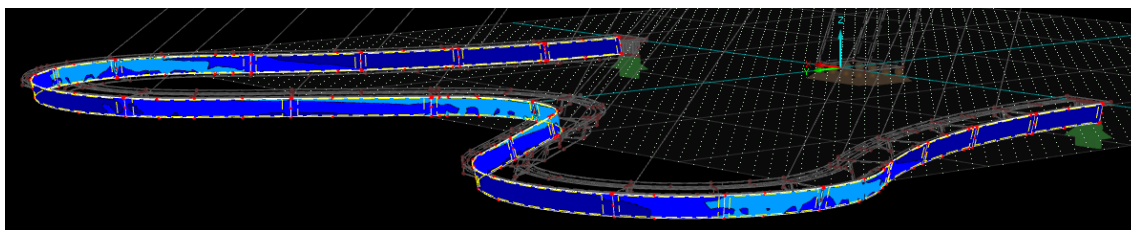


Figura 54 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO13

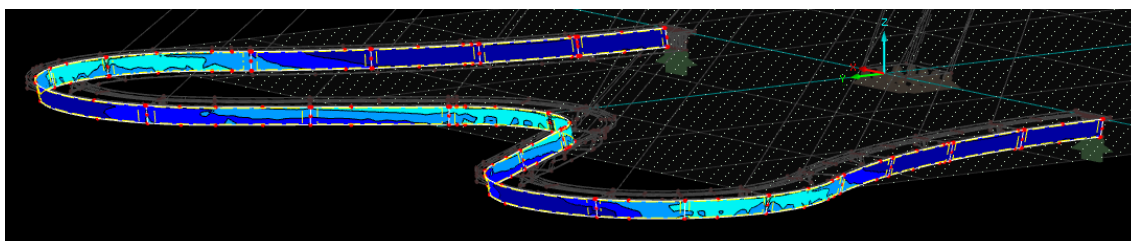


Figura 55 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO14

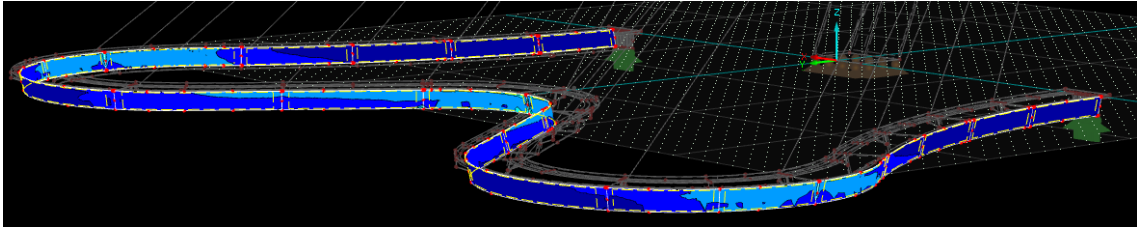


Figura 56 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO15

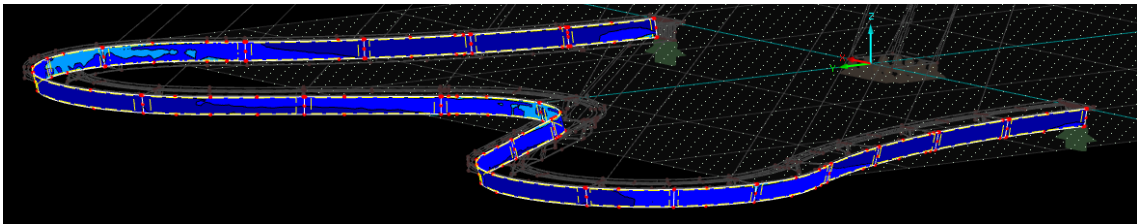


Figura 57 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO16

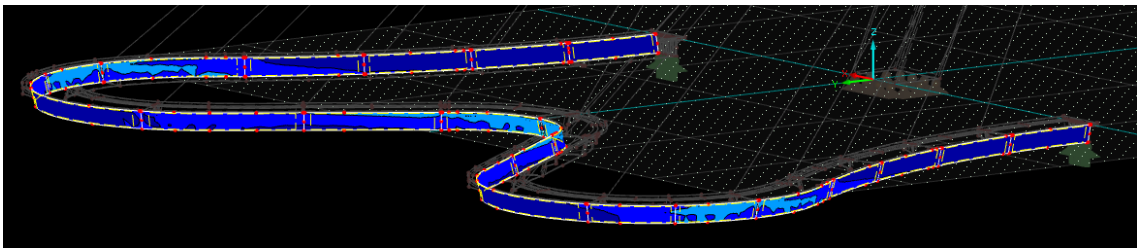


Figura 58 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO17

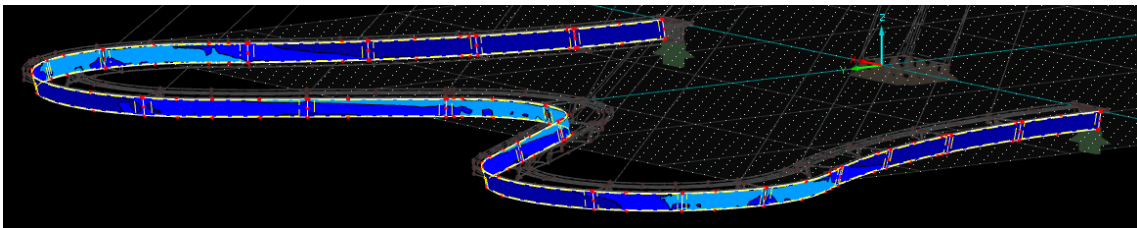


Figura 59 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO18

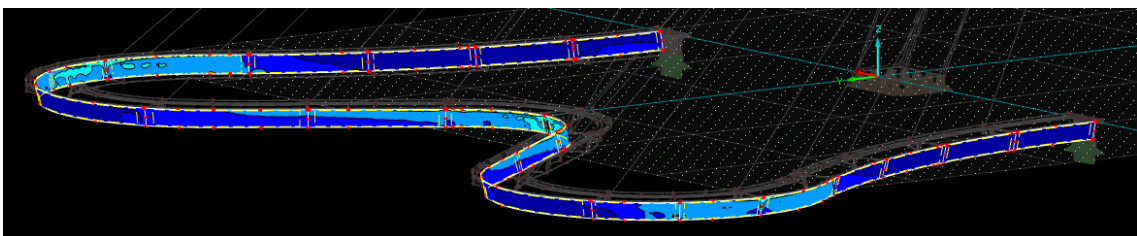


Figura 60 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO19

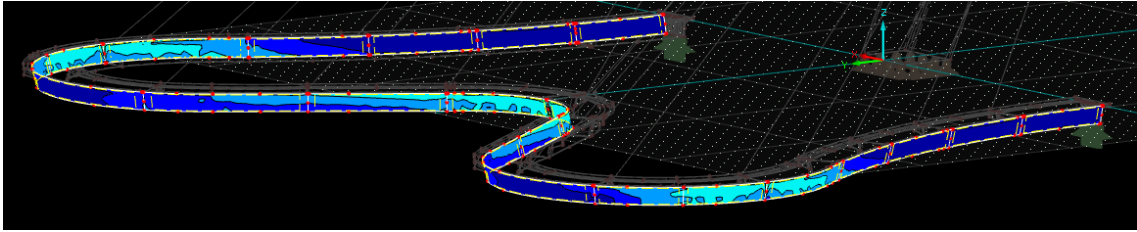


Figura 61 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO20

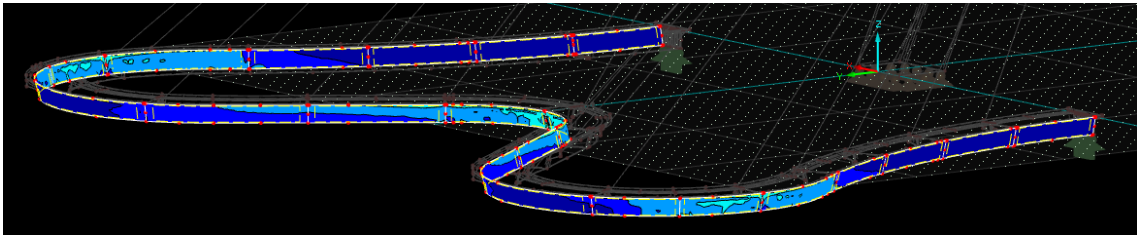


Figura 62 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO21

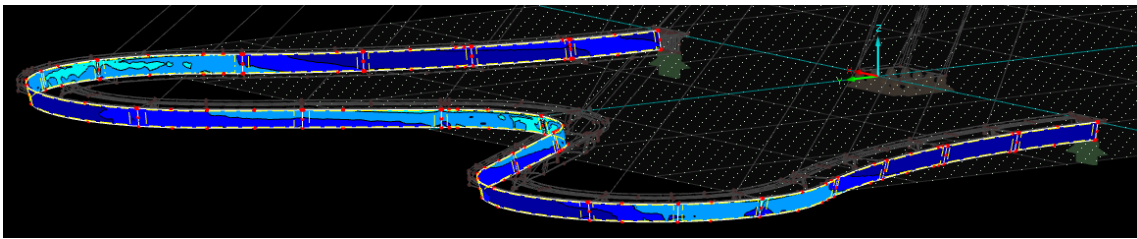


Figura 63 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO22

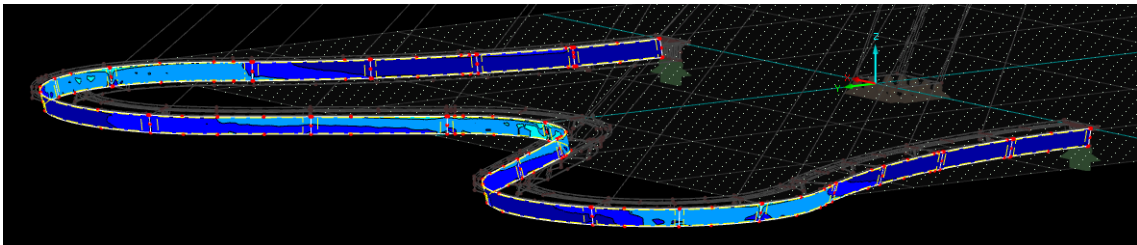


Figura 64 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO23

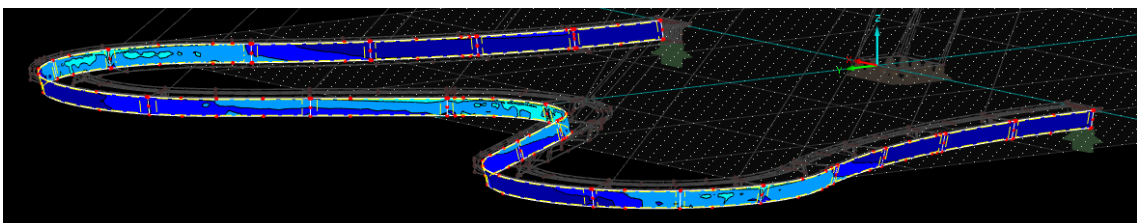


Figura 65 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales exteriores del cajón metálico para CO24

- Laterales interiores

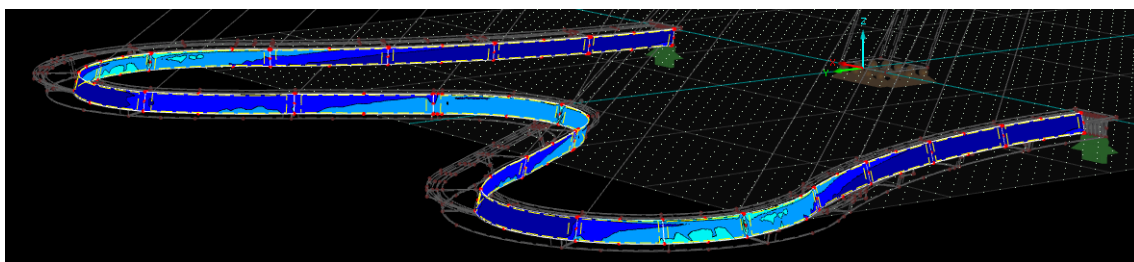


Figura 66 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO13

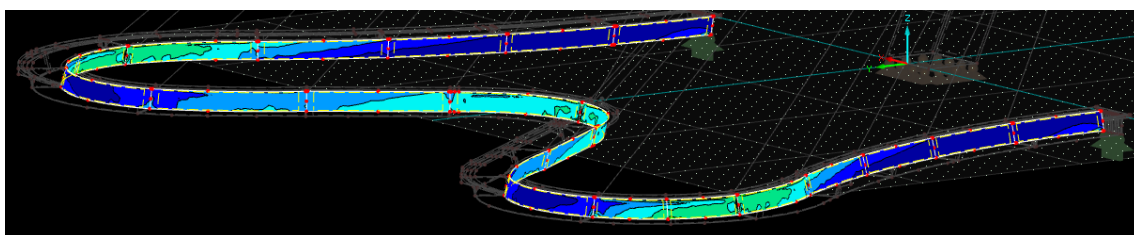


Figura 67– Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO14

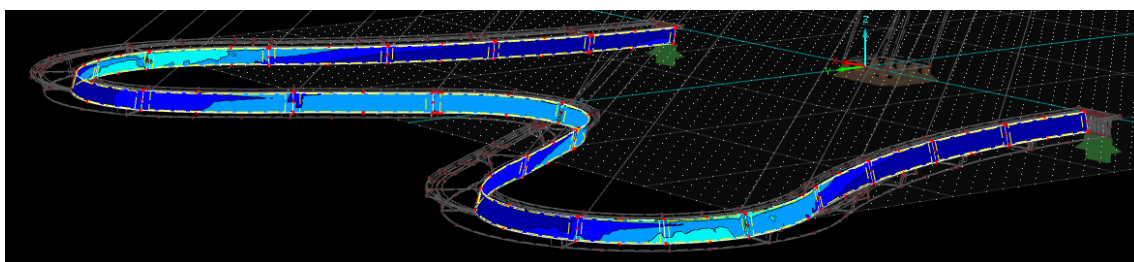


Figura 68 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO15

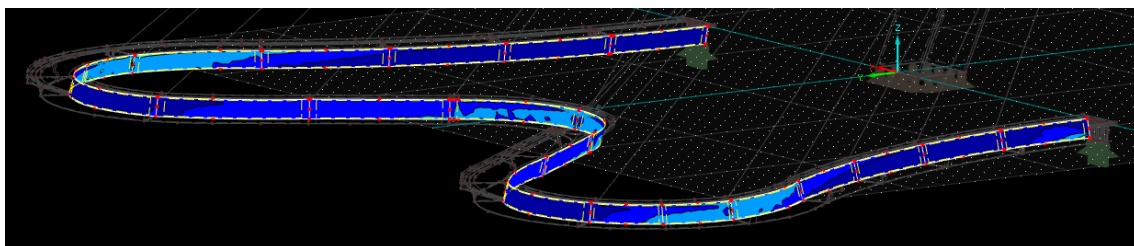


Figura 69 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO16

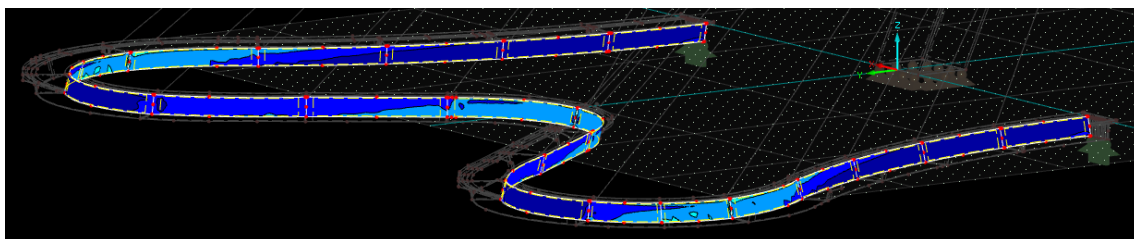


Figura 70 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO17

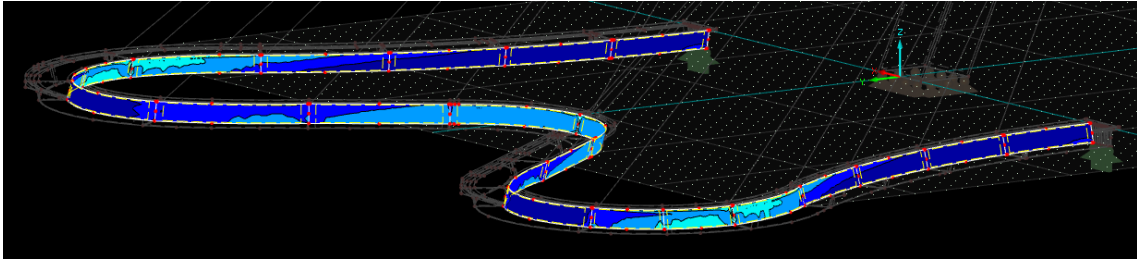


Figura 71 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO18

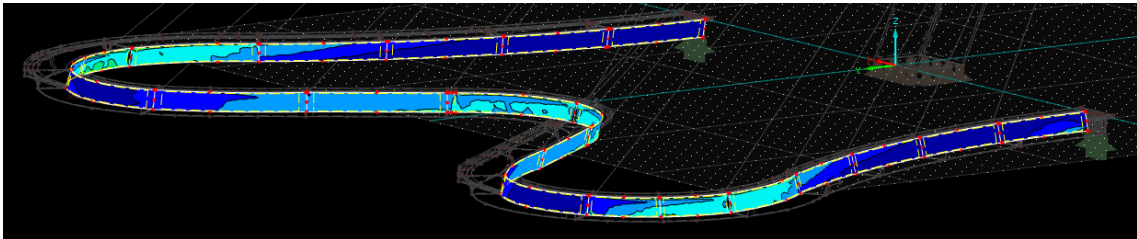


Figura 72 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO19

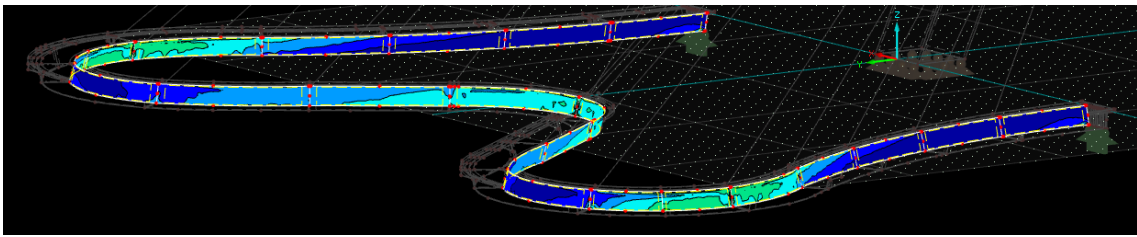


Figura 73 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO20

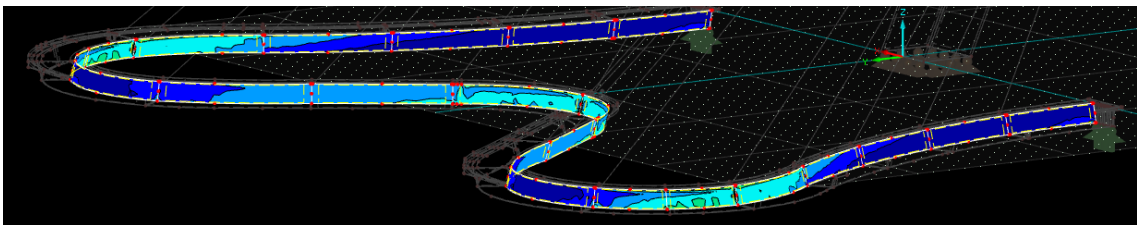


Figura 74 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO21

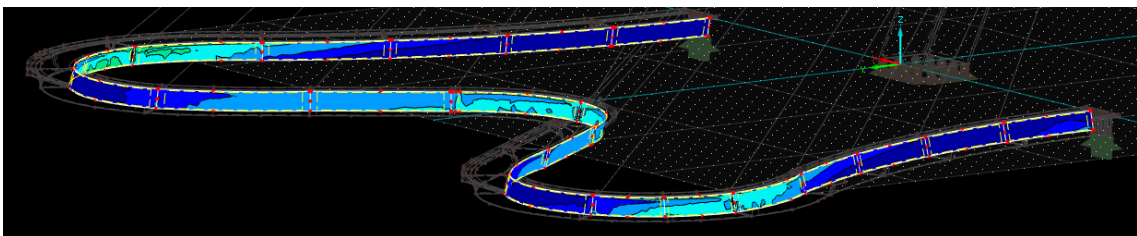


Figura 75 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO22

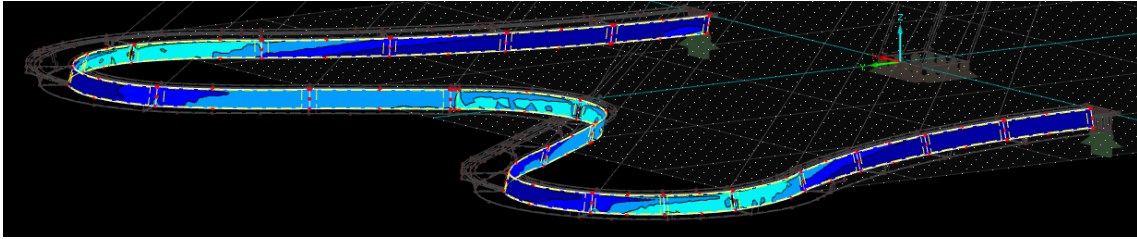


Figura 76 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO23

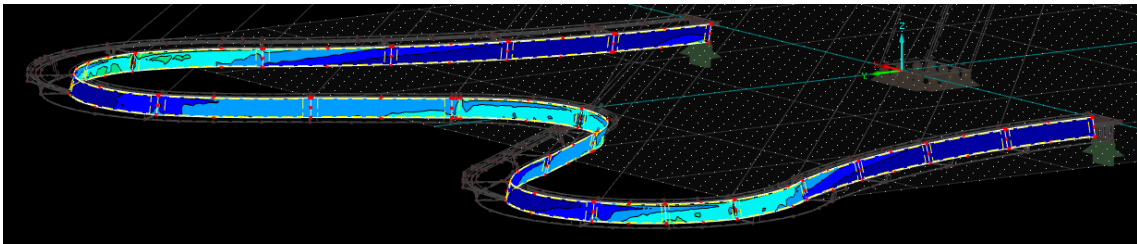


Figura 77 – Tensiones máximas de Von Misses en laterales interiores del cajón metálico para CO24

- Base

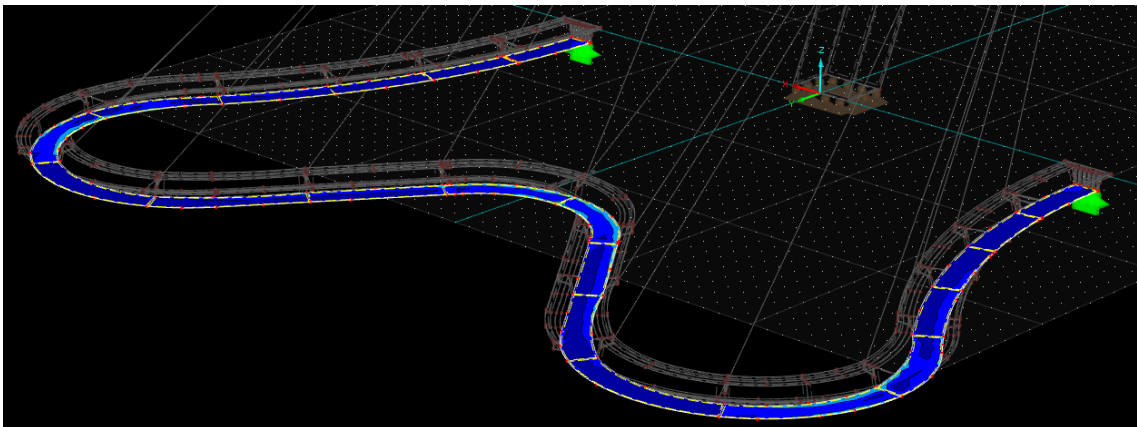


Figura 78 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO13

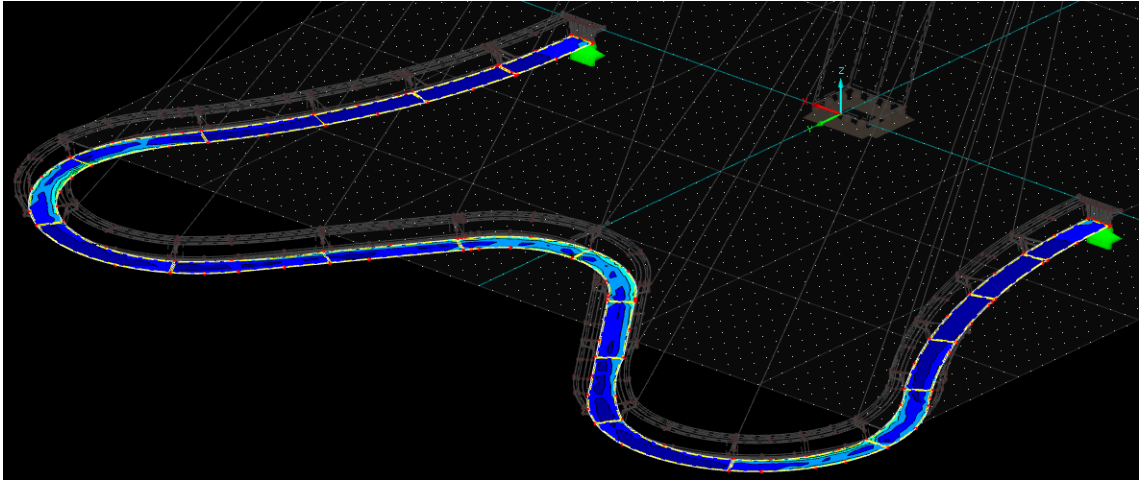


Figura 79 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO14

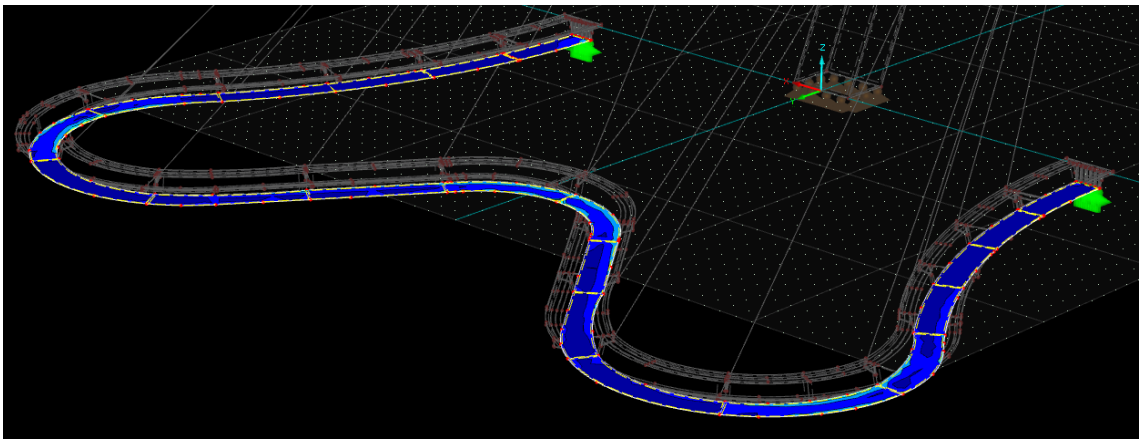


Figura 80 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO15

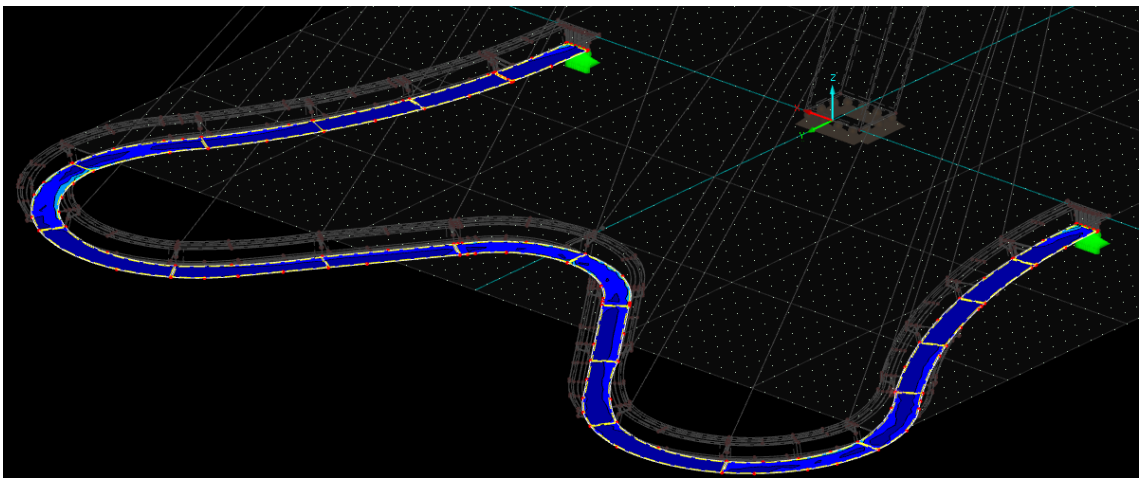


Figura 81 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO16

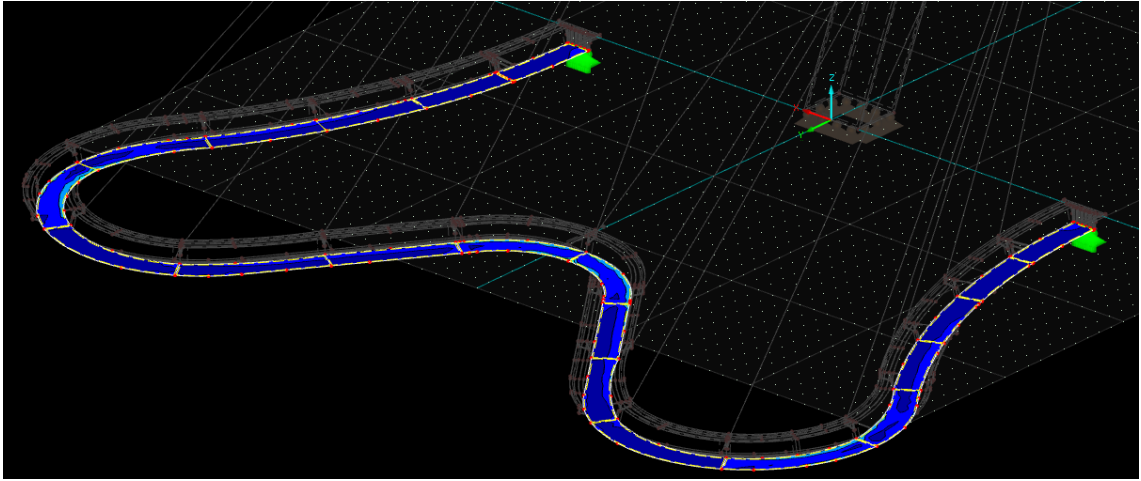


Figura 82 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO17

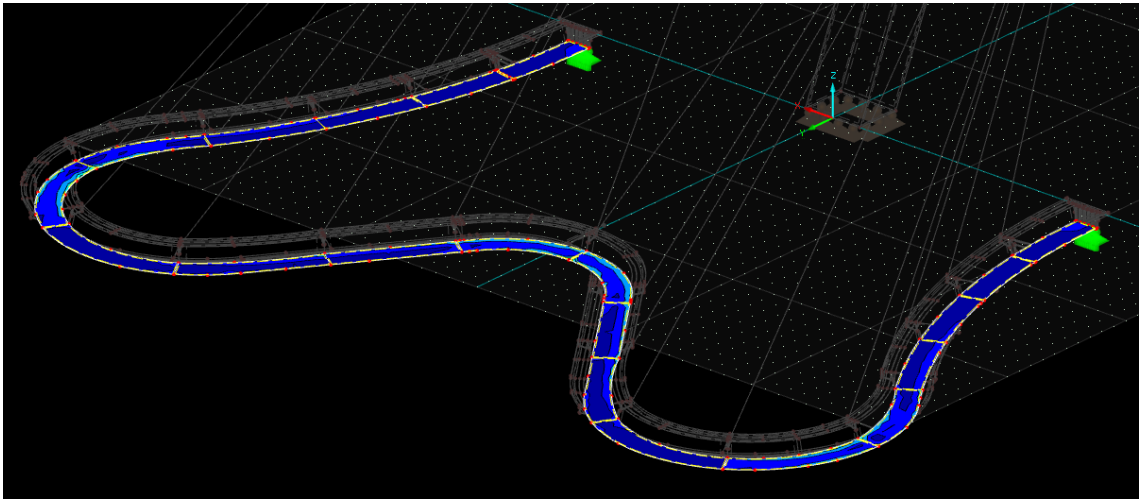


Figura 83 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO18

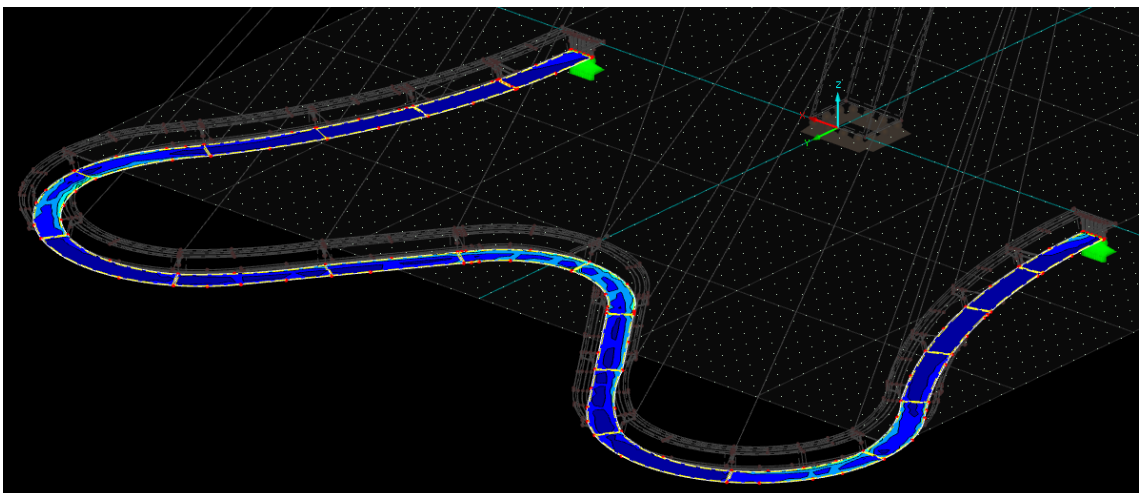


Figura 84 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO19

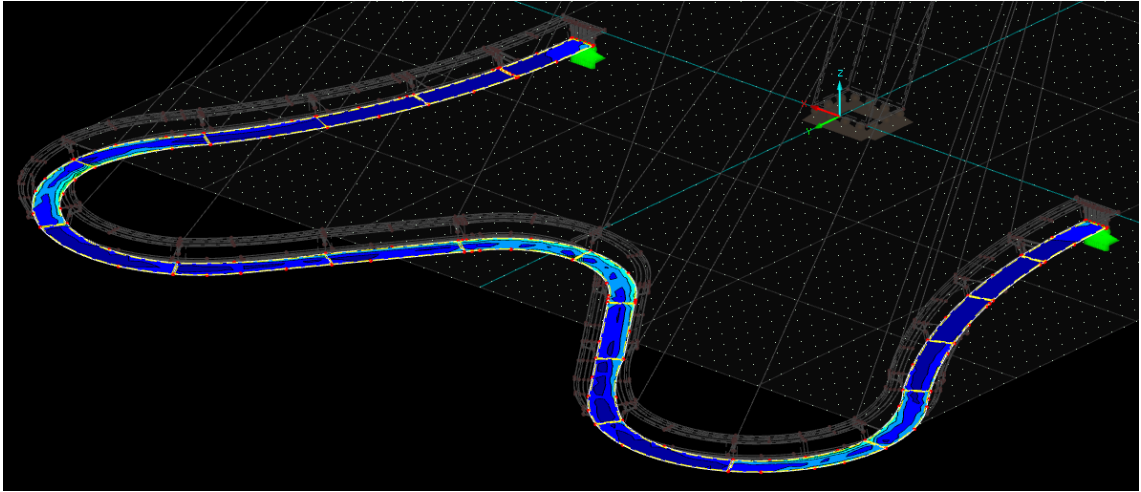


Figura 85 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO20

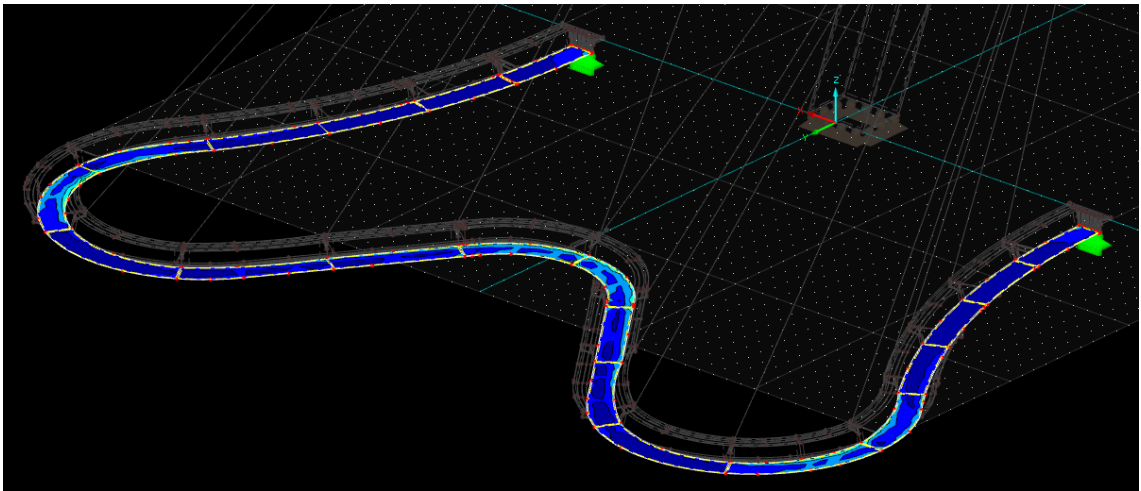


Figura 86 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO21

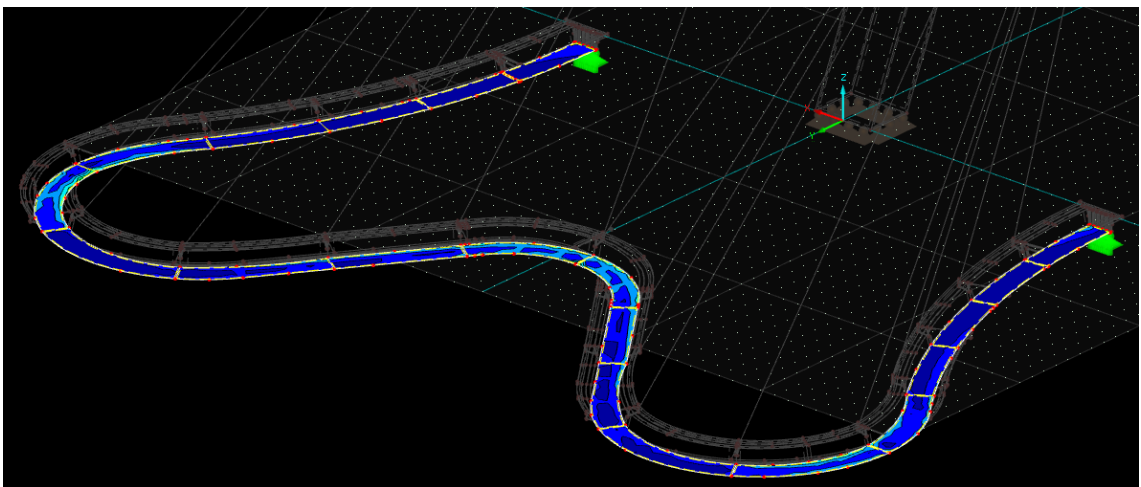


Figura 87 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO22

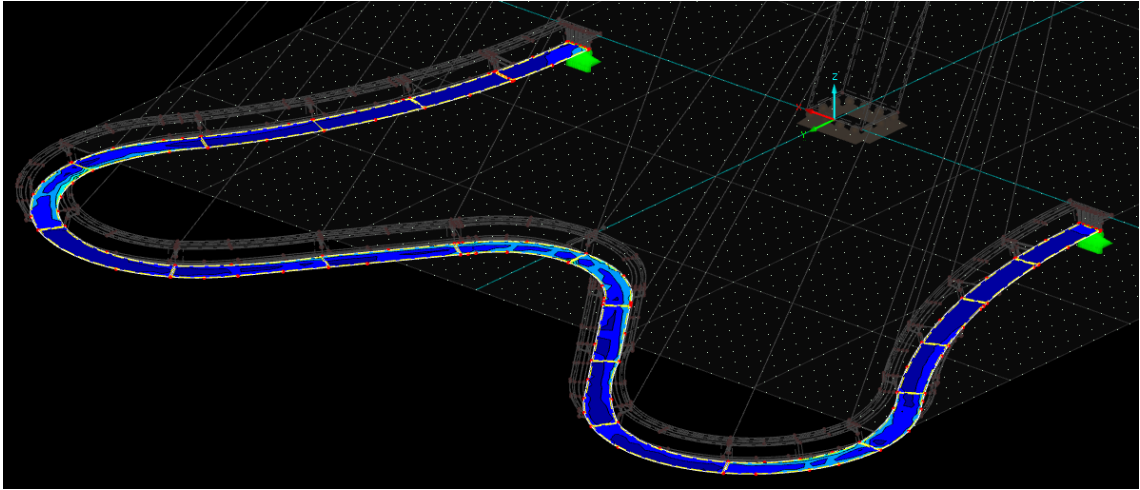


Figura 88 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO23

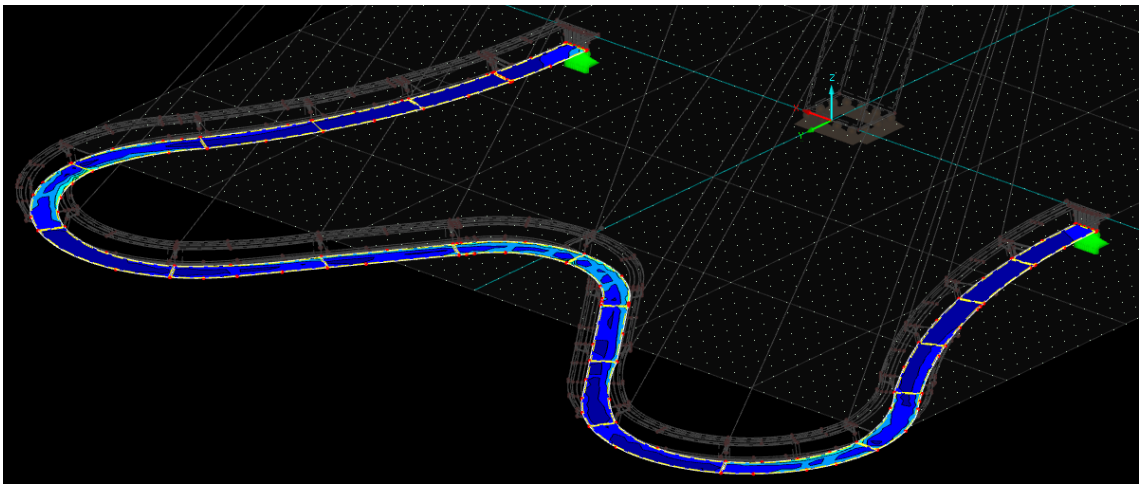


Figura 89 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO24

- Diafragmas

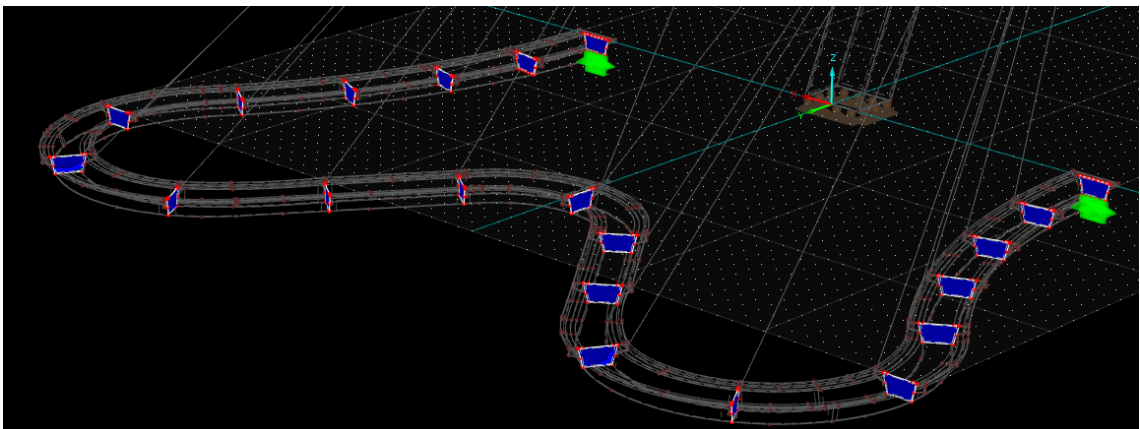


Figura 90 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO13

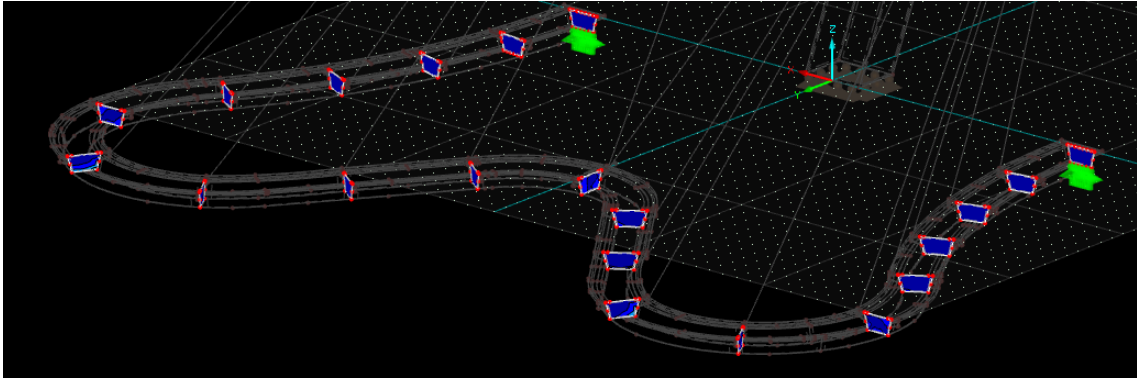


Figura 91 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO14

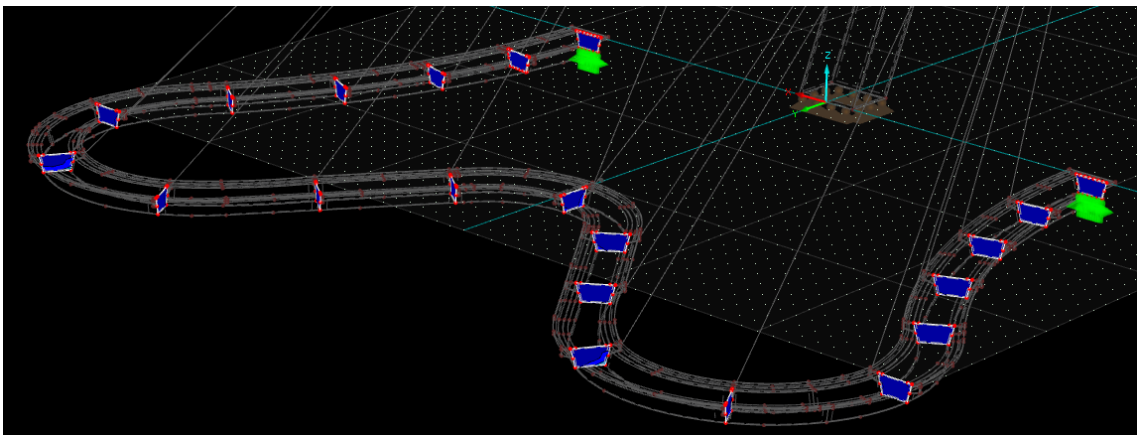


Figura 92 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO15

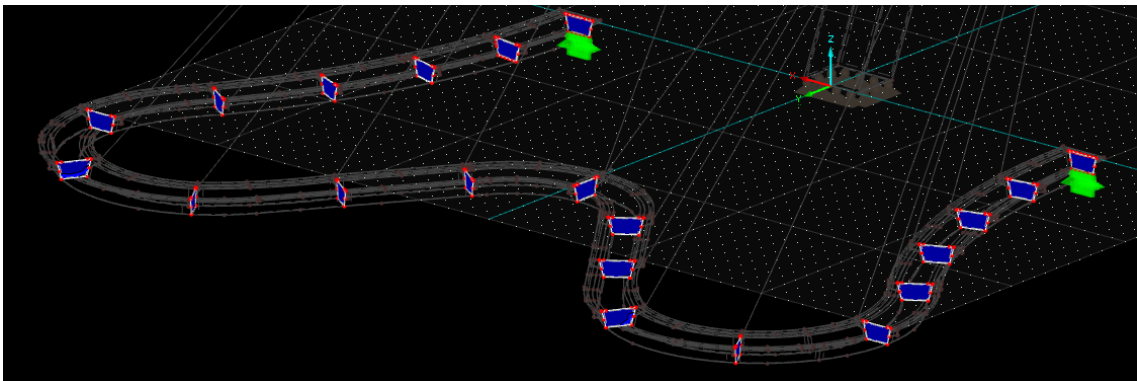


Figura 93 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO16

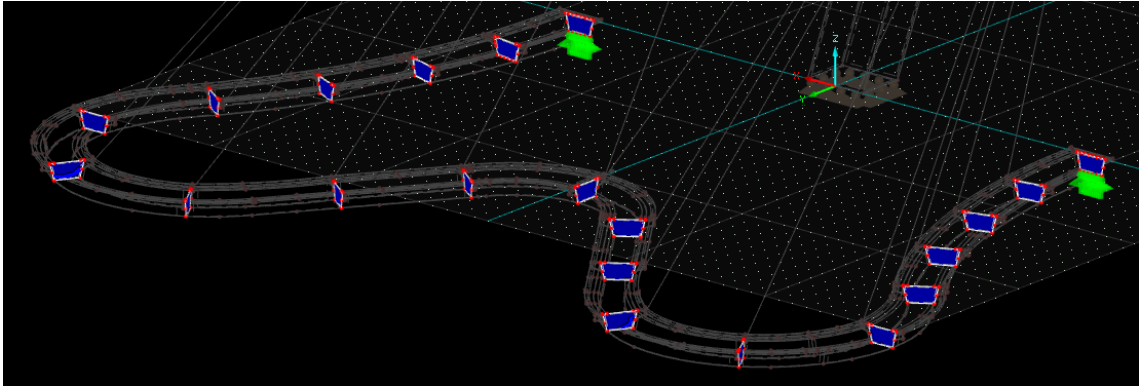


Figura 94 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO17

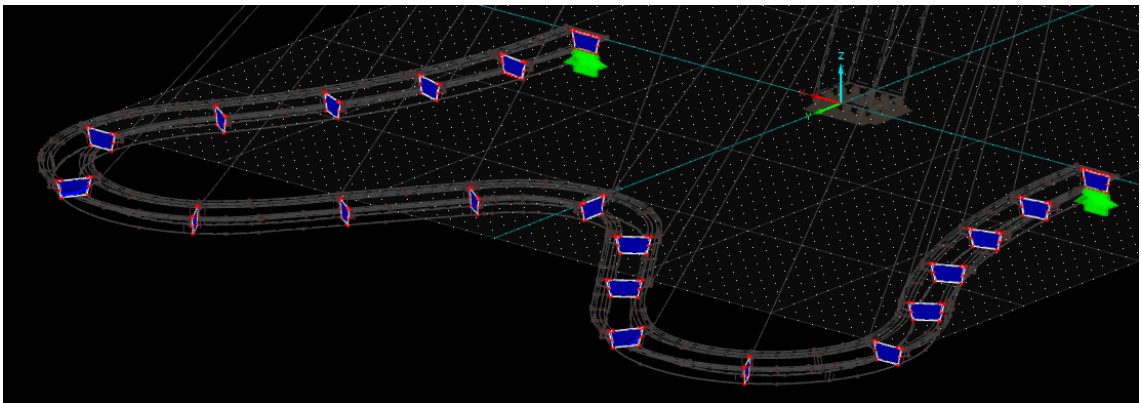


Figura 95 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO18

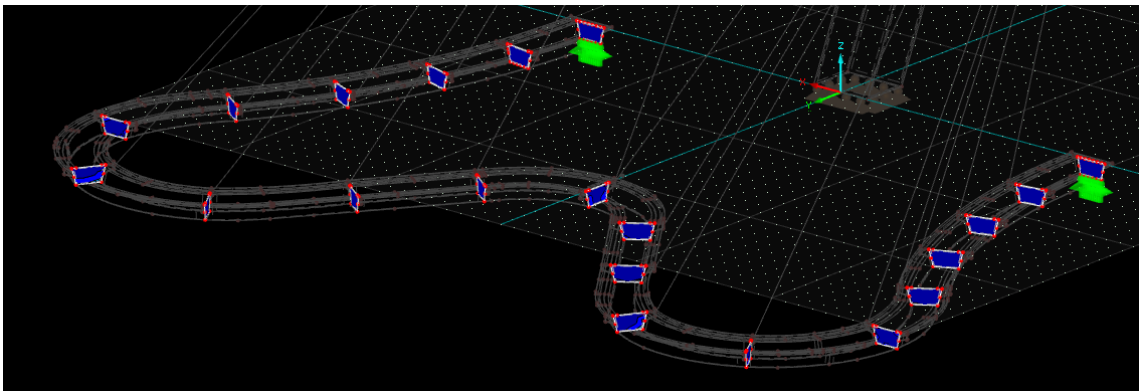


Figura 96 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO19

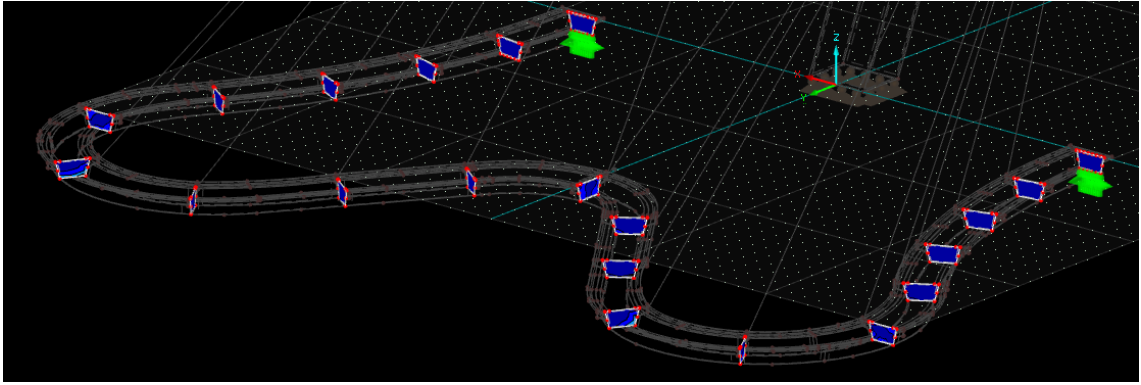


Figura 97 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO20

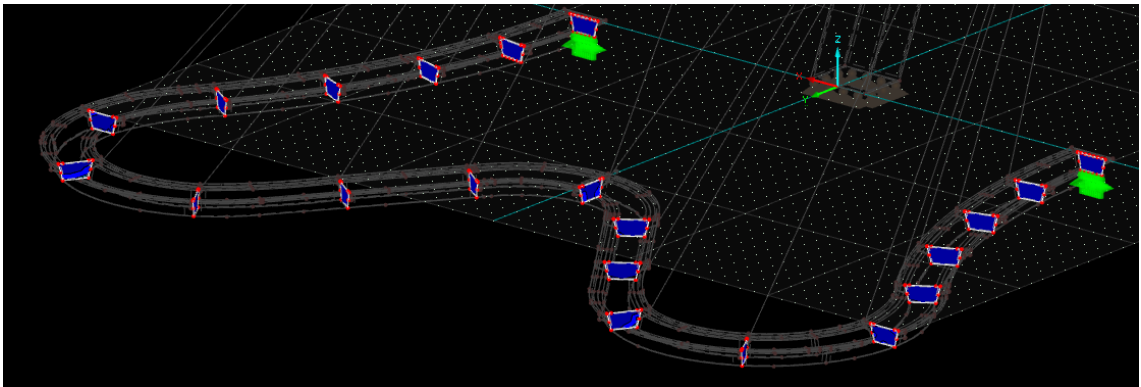


Figura 98 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO21

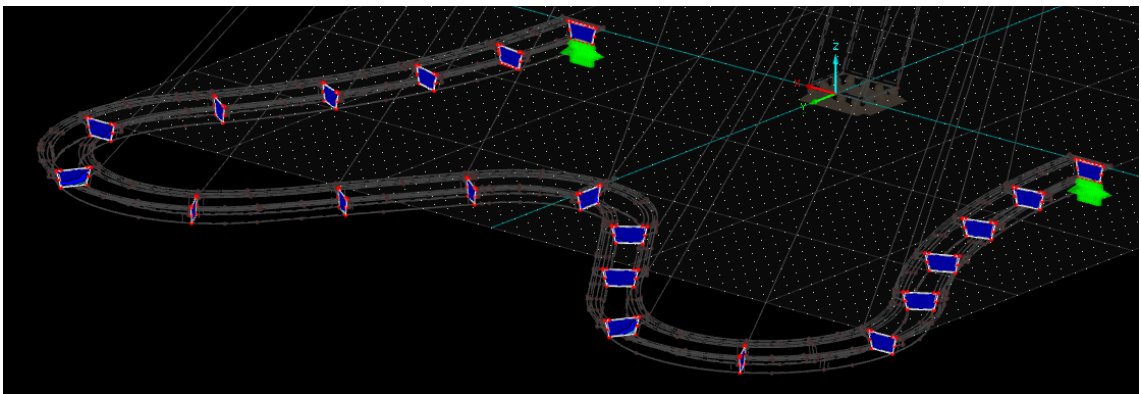


Figura 99 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO22

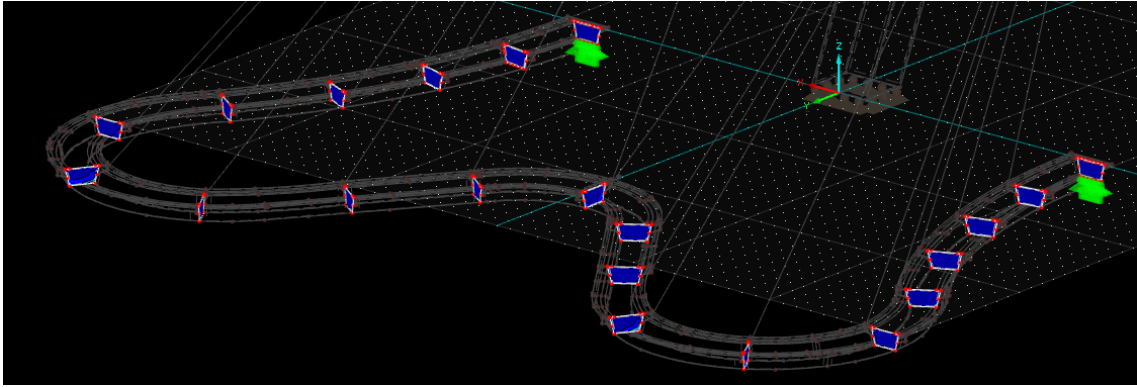


Figura 100 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO23

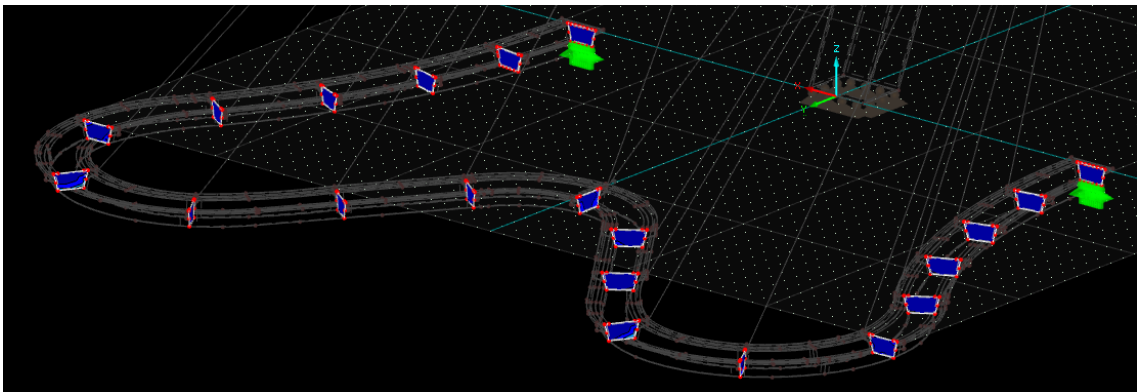


Figura 101 – Tensiones máximas de Von Misses en bases del cajón metálico para CO24

- Rigidizadores longitudinales:

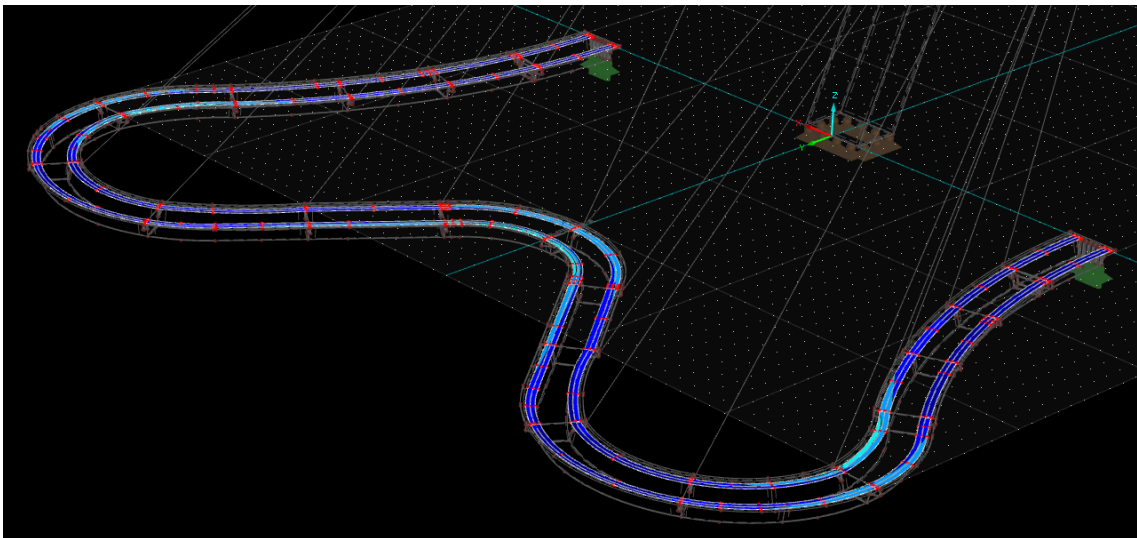


Figura 102 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO13

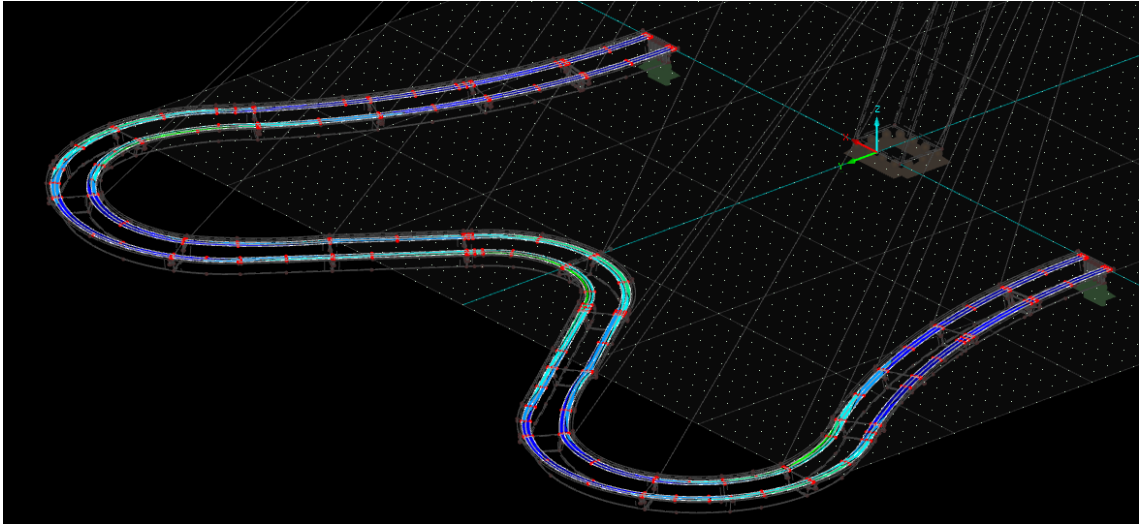


Figura 103 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO14

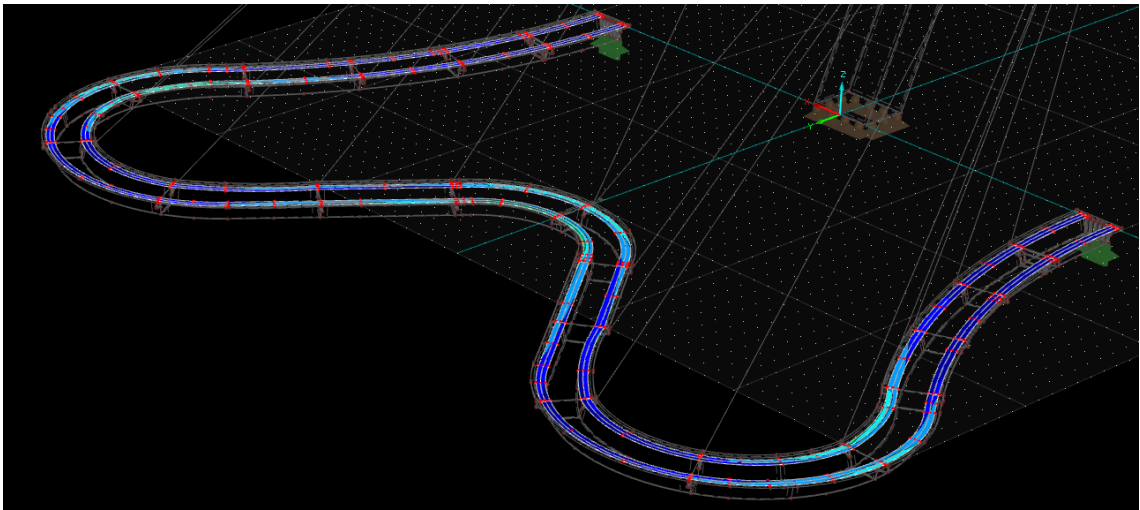


Figura 104 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO15

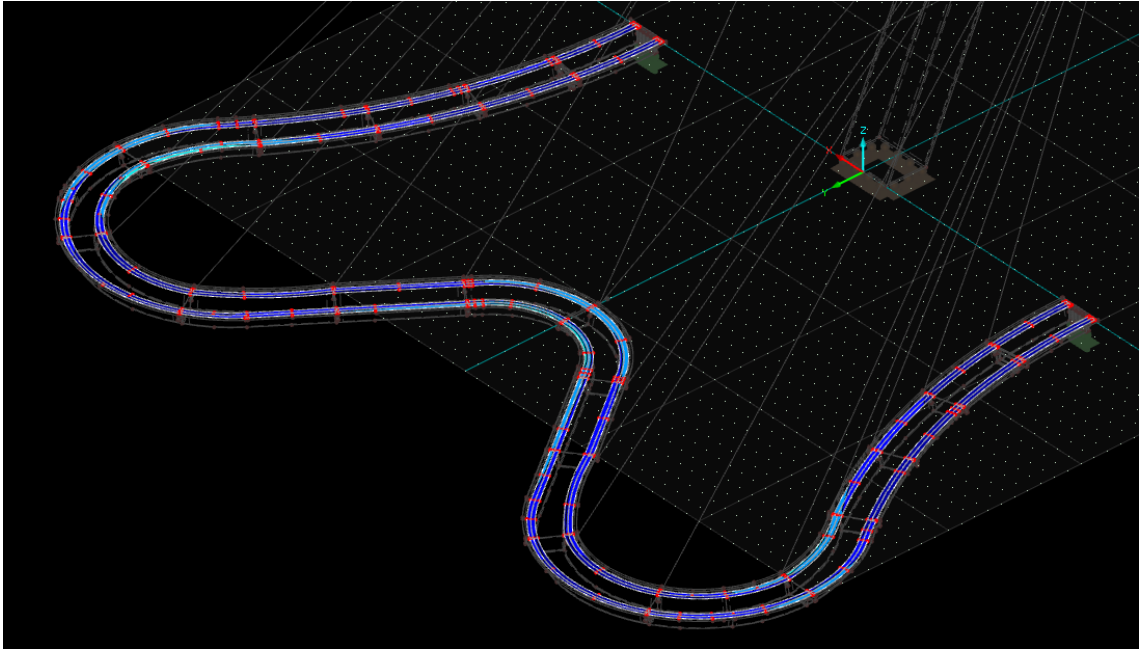


Figura 105 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO16

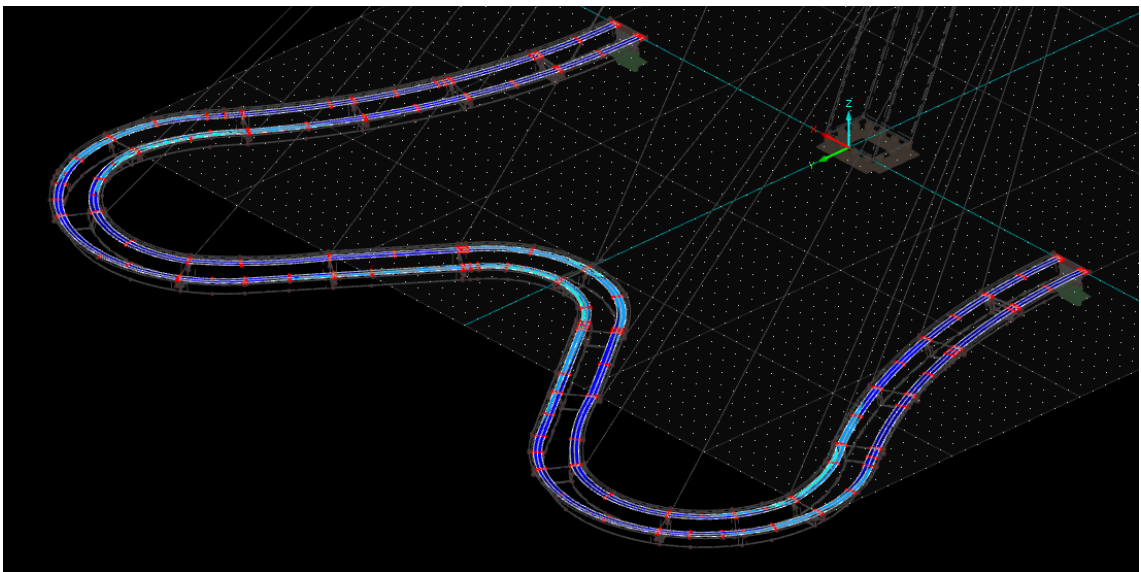


Figura 106 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO17

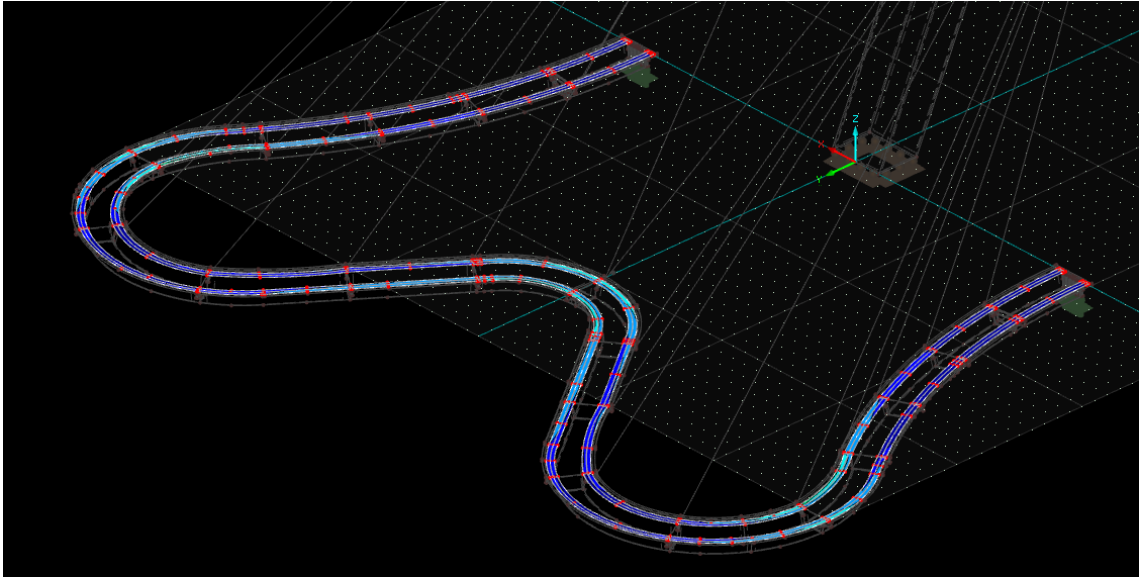


Figura 107 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO18

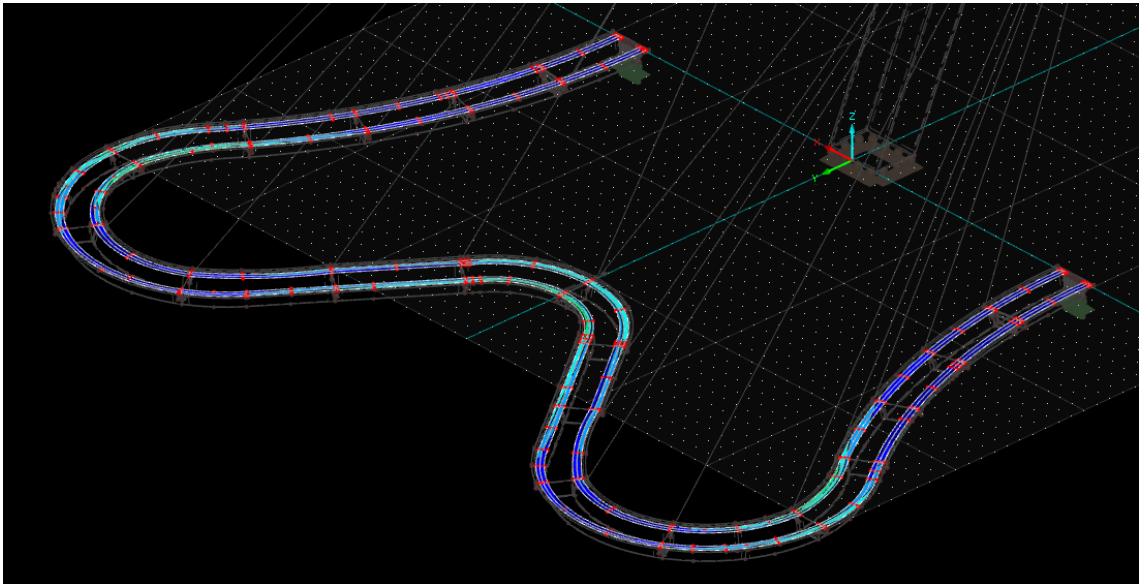


Figura 108 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO19

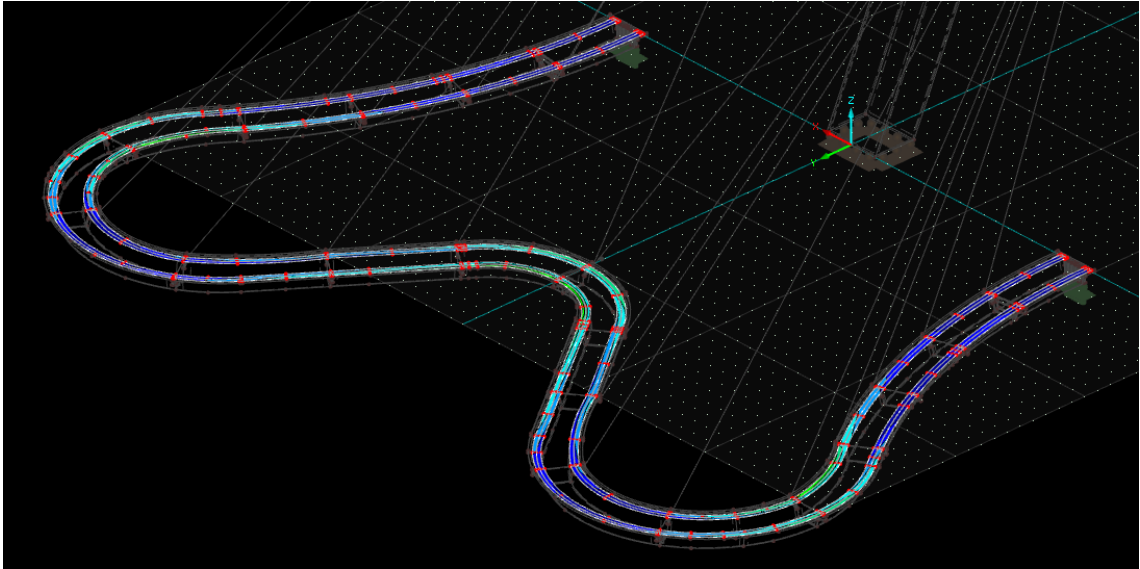


Figura 109 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO20

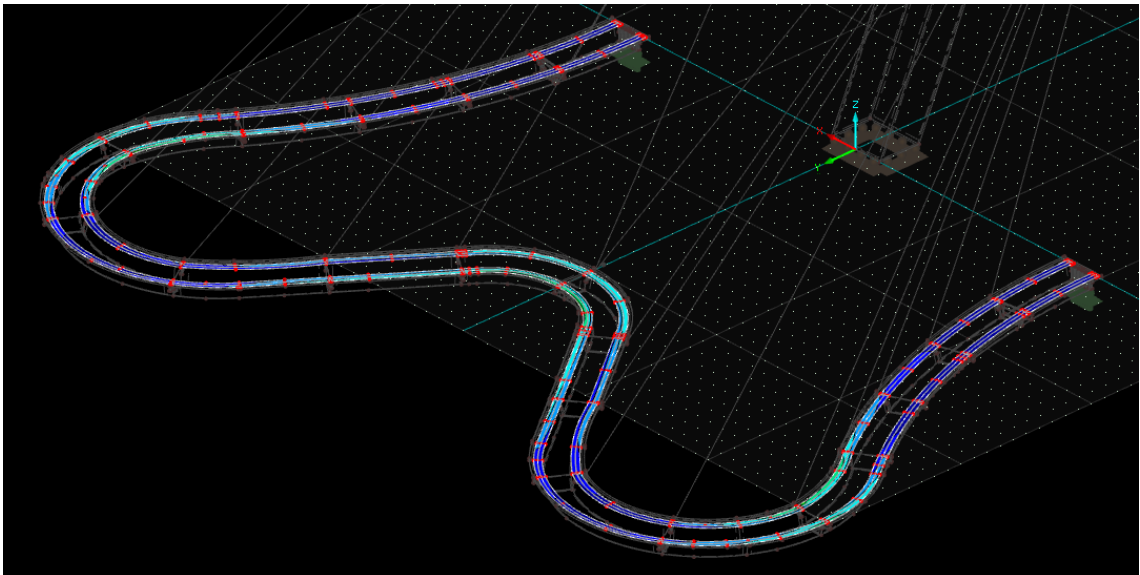


Figura 110 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO21

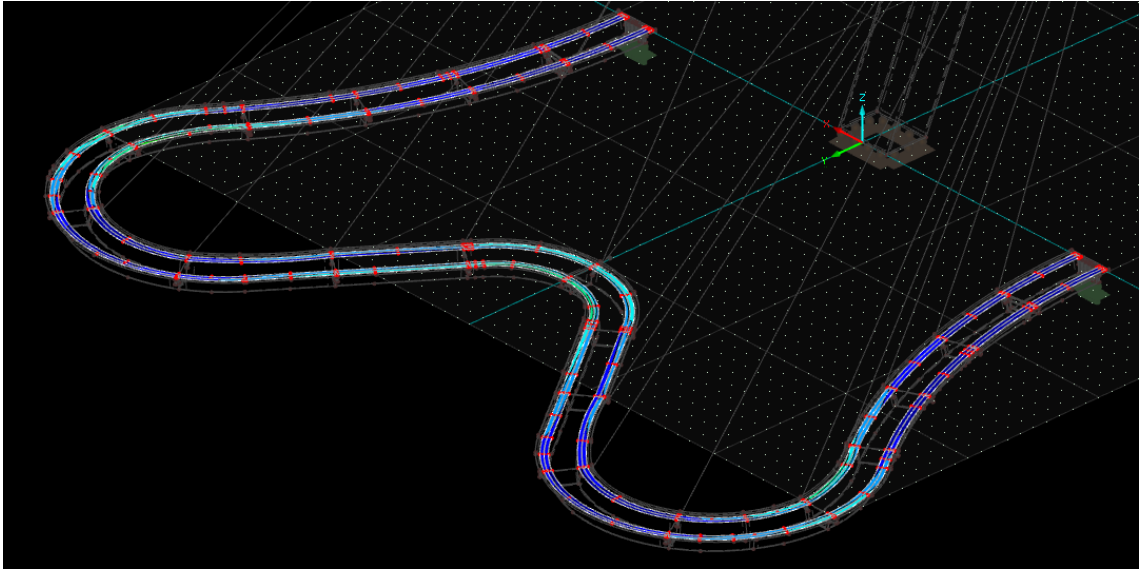


Figura 111 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO22

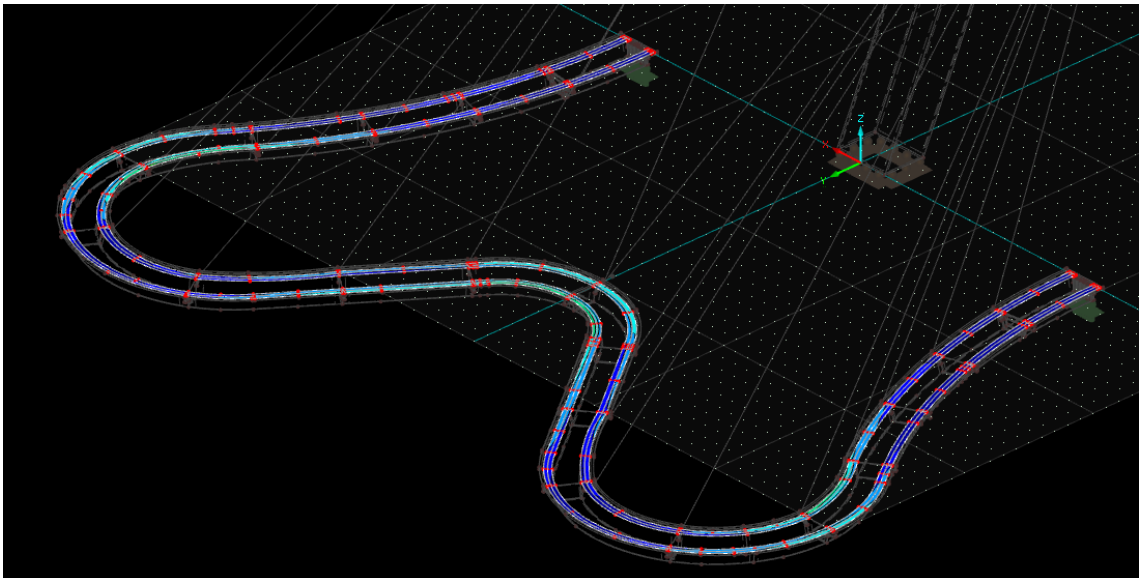


Figura 112 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO23

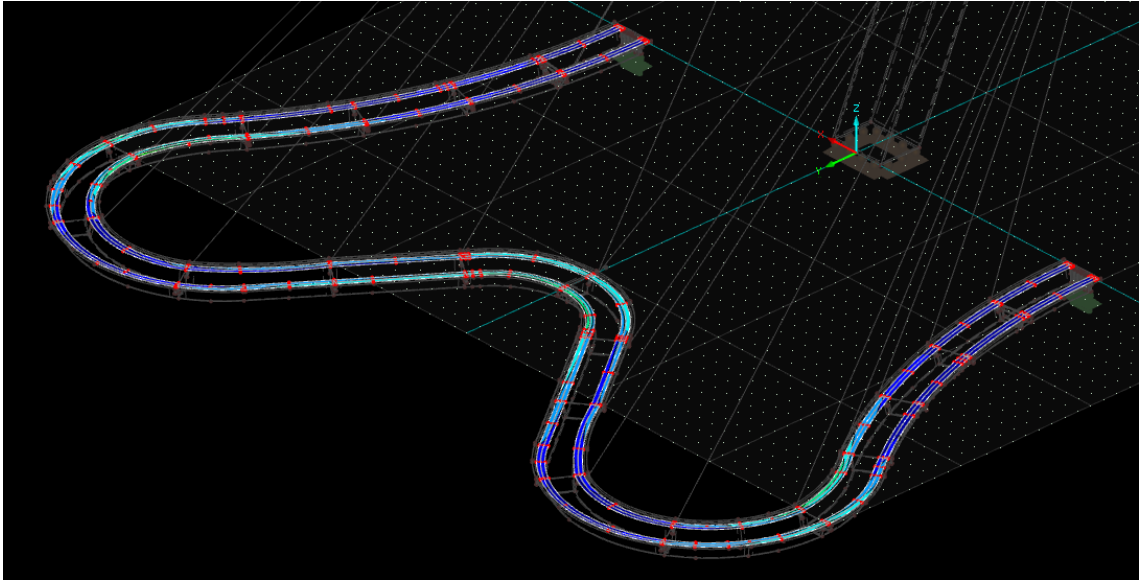


Figura 113 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO24

- Rigidizadores verticales (UPN 300)

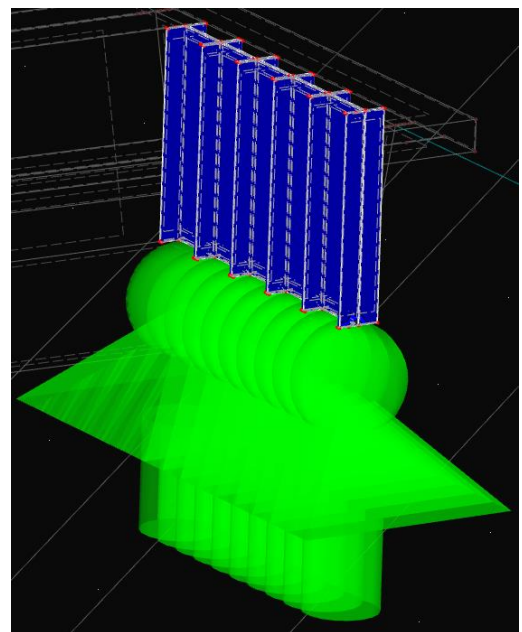
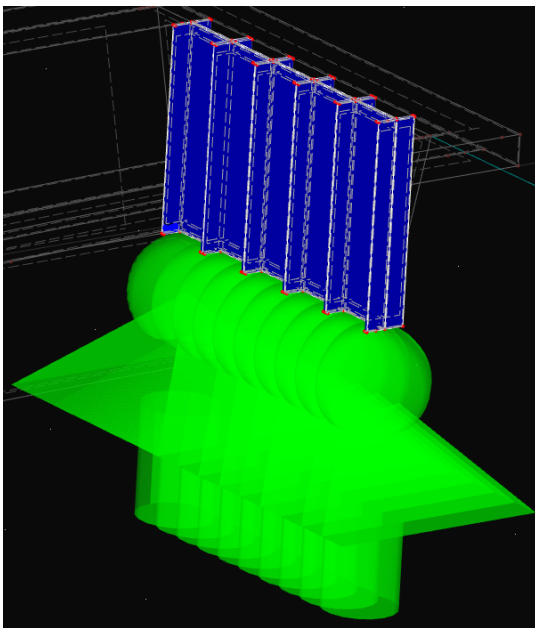


Figura 114 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO13

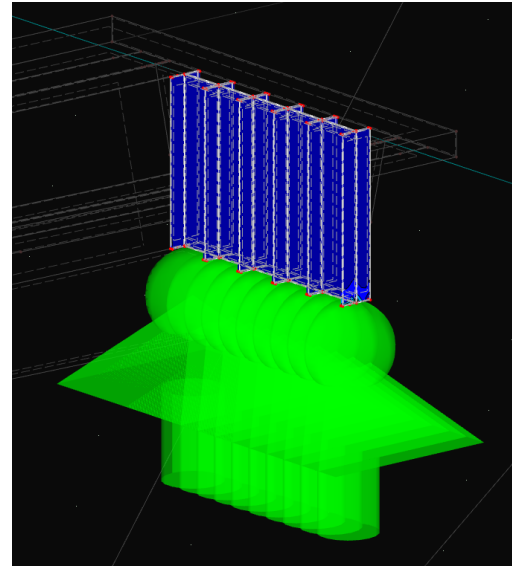
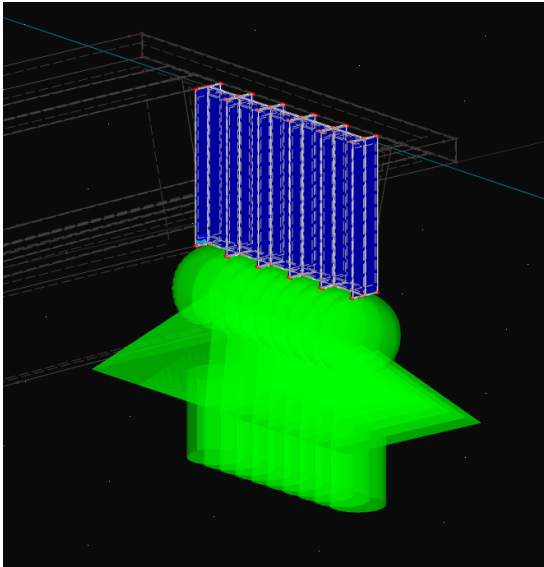


Figura 115 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO14

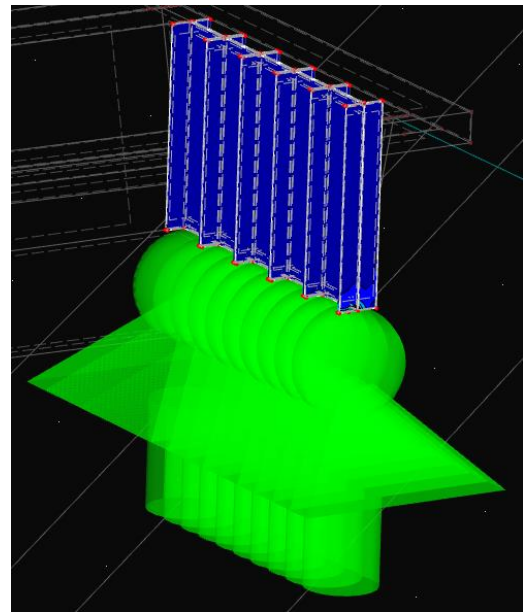
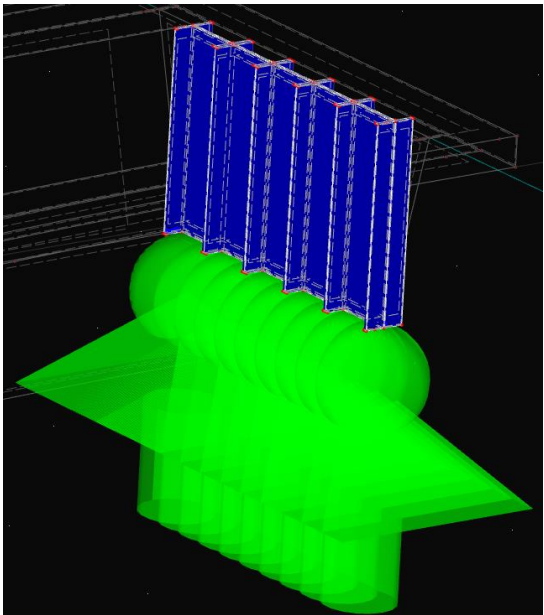


Figura 116 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO15

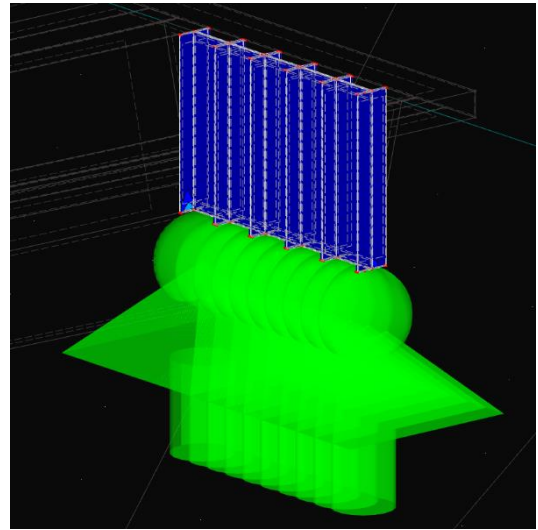
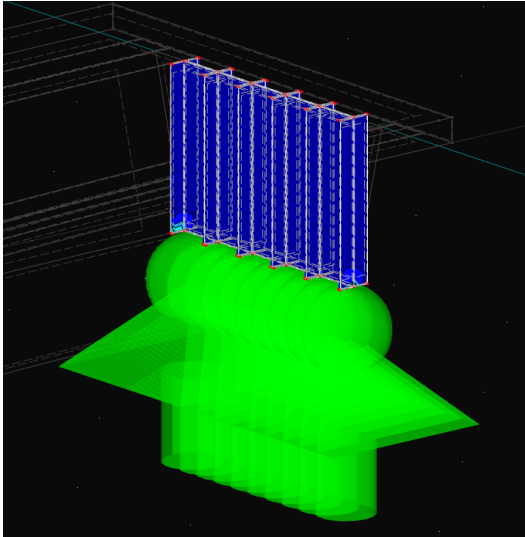


Figura 117 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO16

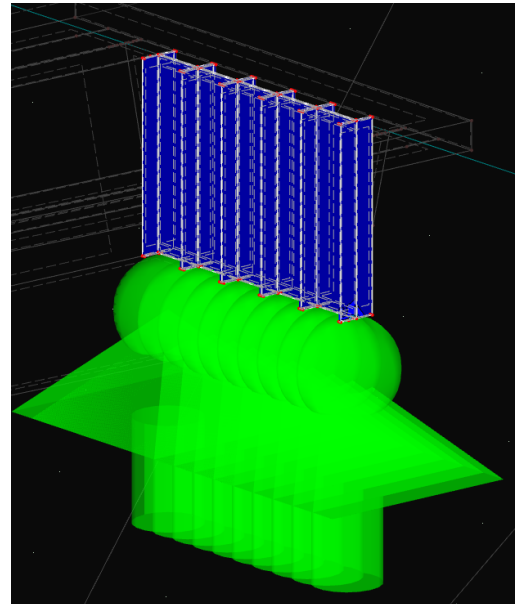
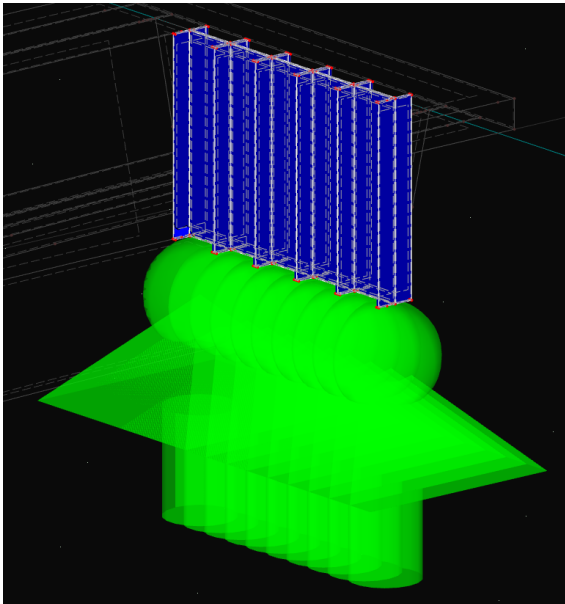


Figura 118 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO17

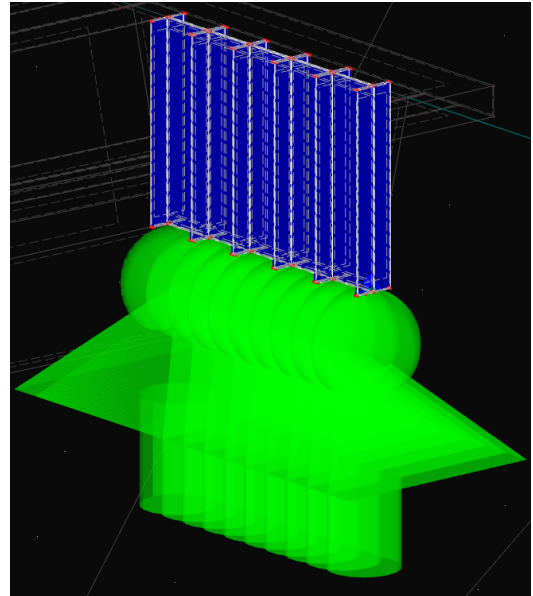
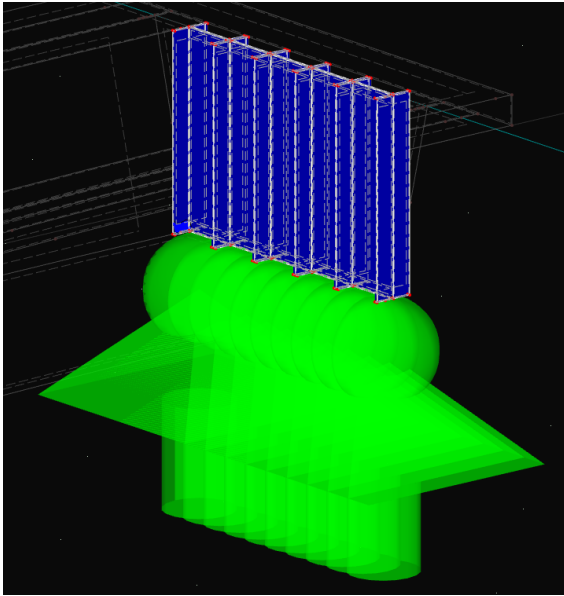


Figura 119 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO18

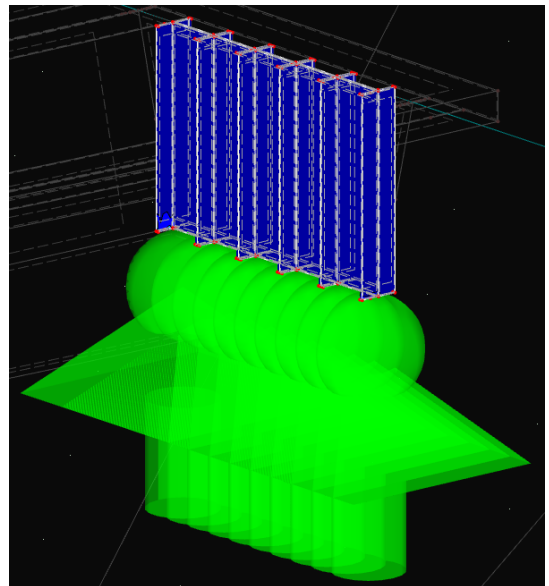
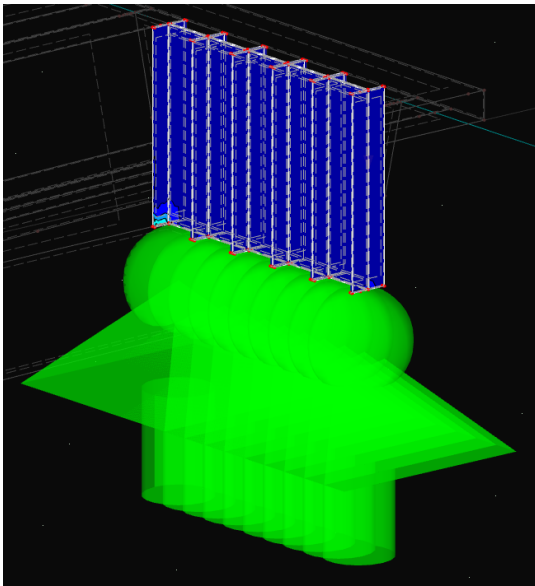


Figura 120 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO19

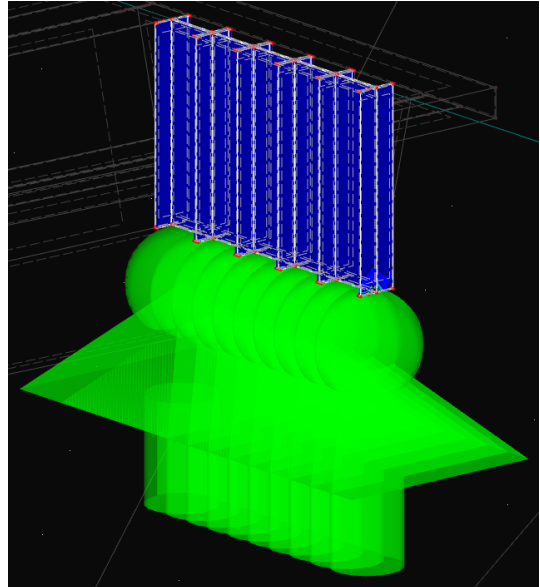
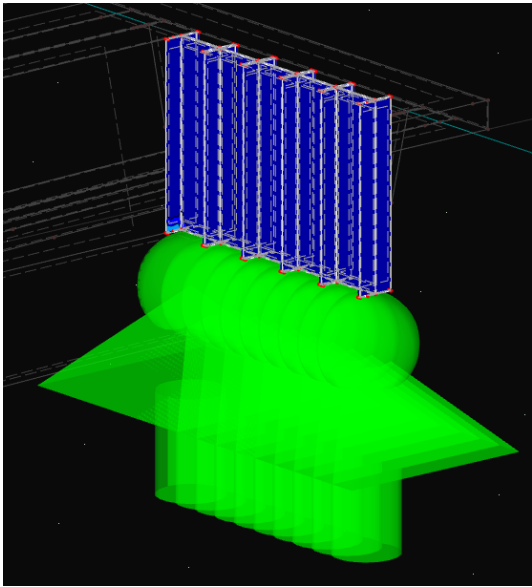


Figura 121 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO20

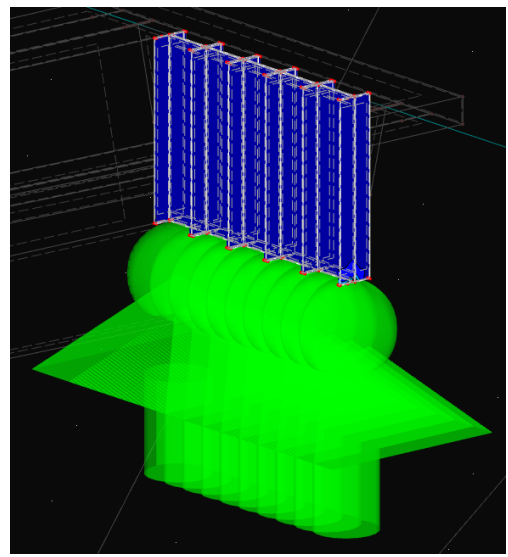
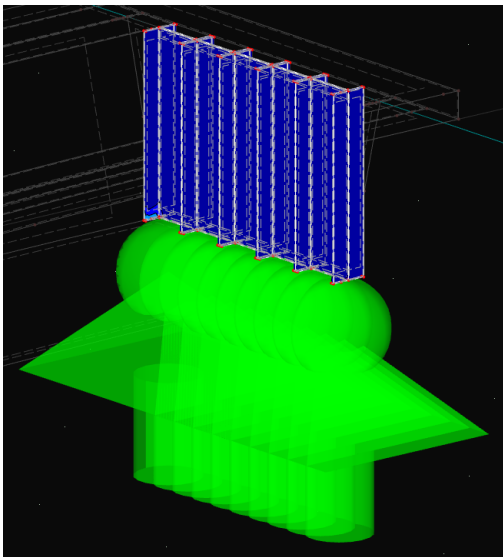


Figura 122 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO21

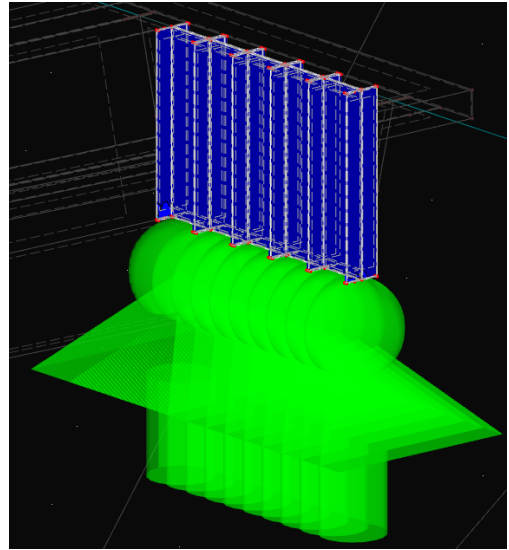
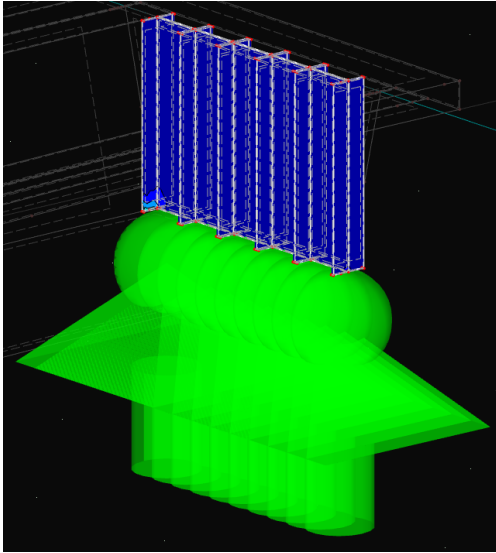


Figura 123 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO22

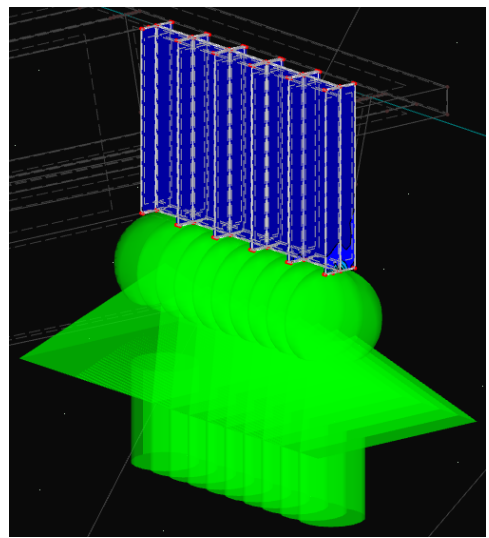
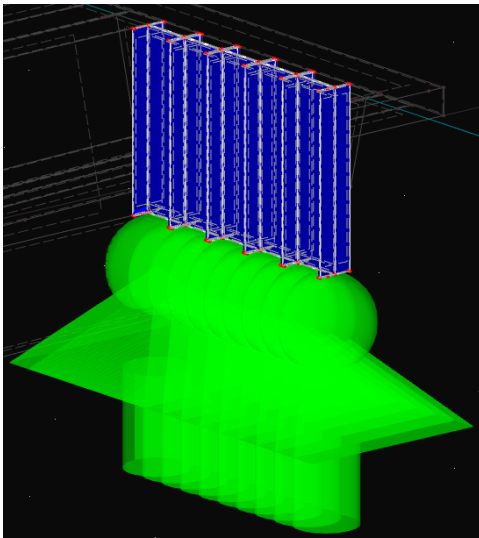


Figura 124 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO23

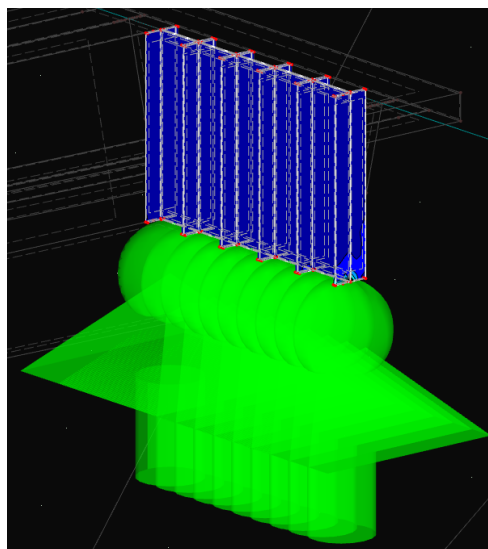
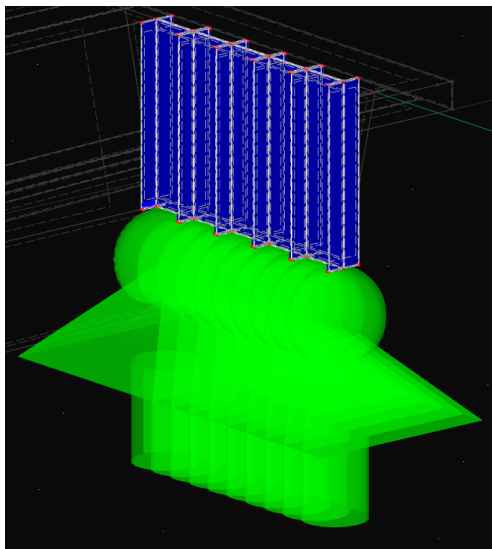


Figura 125 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO24

- Marco rígido (UPN 300)

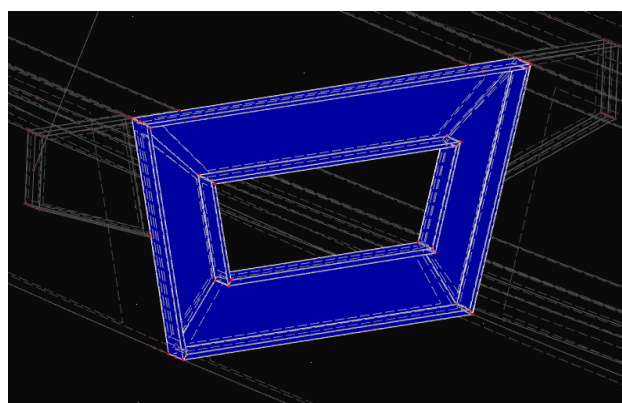
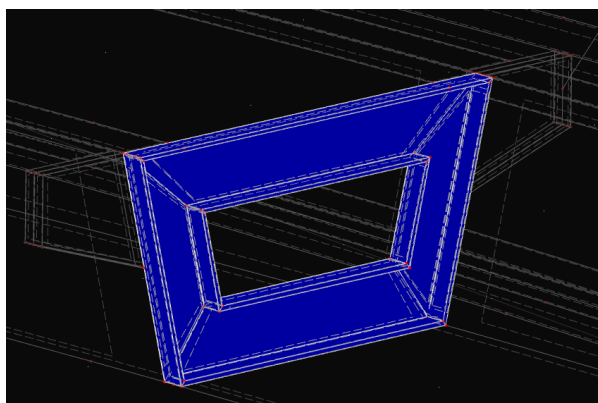


Figura 126 – Tensiones máximas de Von Mises en marco rígido del cajón metálico para CO13

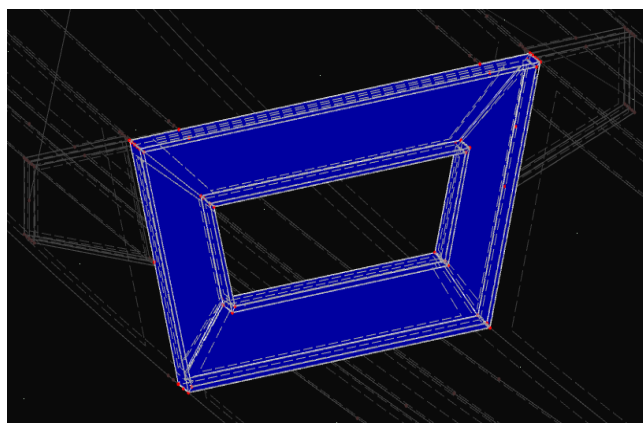
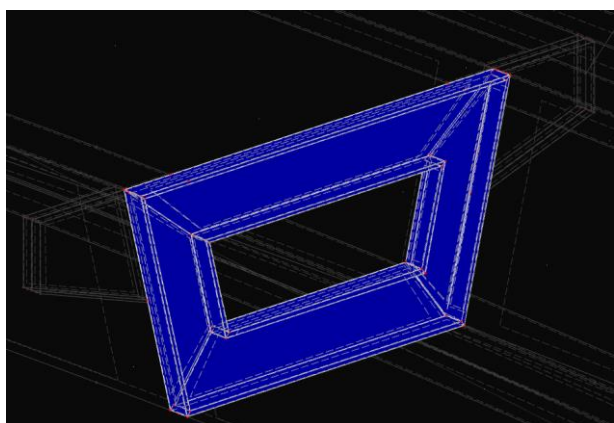


Figura 127 – Tensiones máximas de Von Mises en marco rígido del cajón metálico para CO14

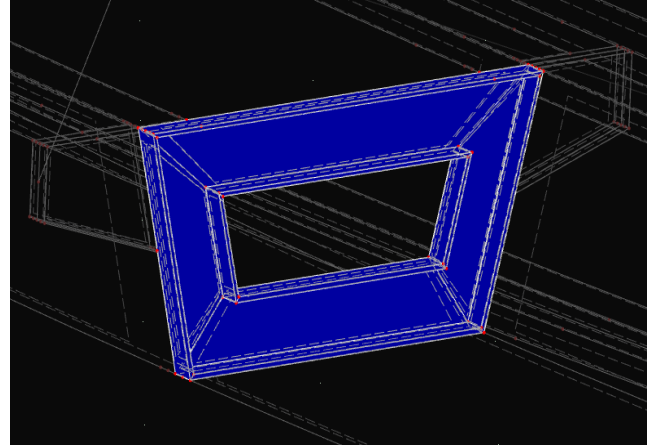
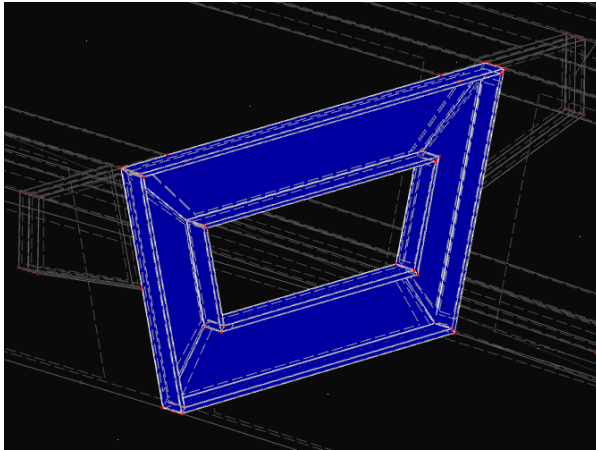


Figura 128 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO15

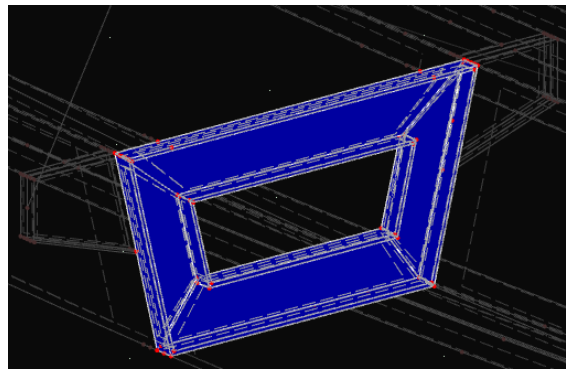
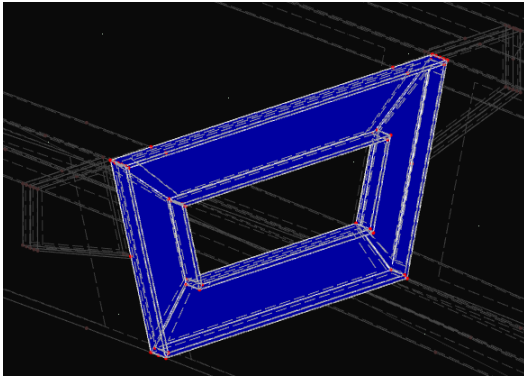


Figura 129 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO16

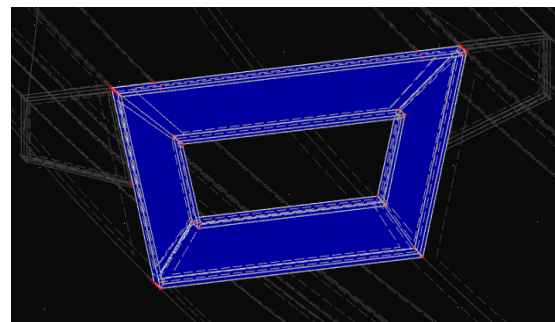
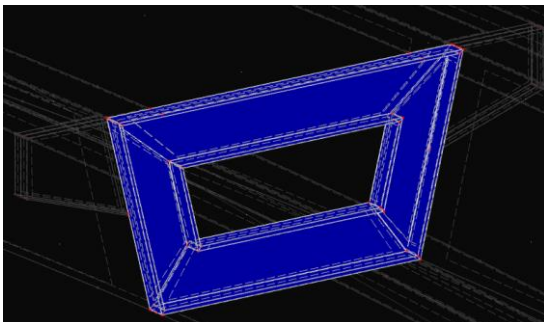


Figura 130 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO17

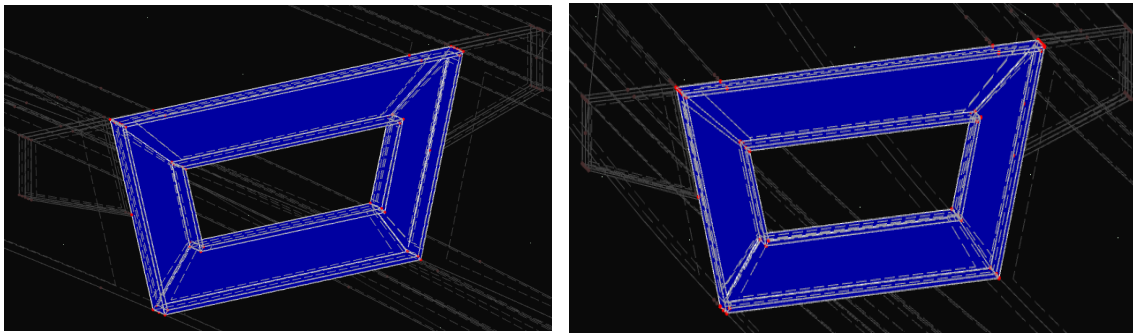


Figura 131 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO18

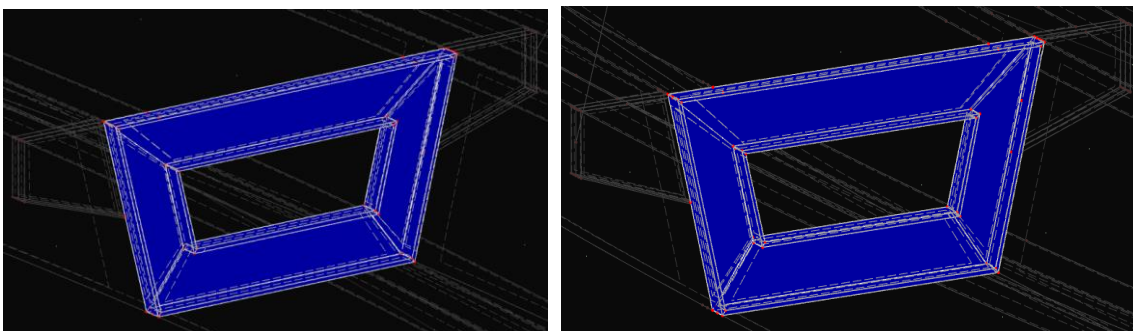


Figura 132 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO19

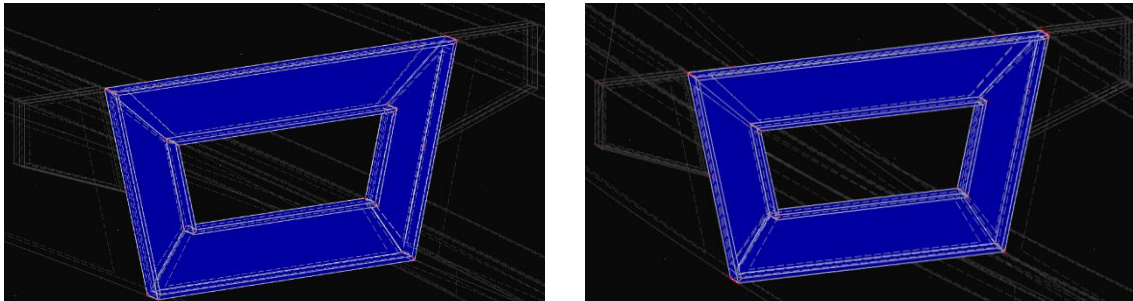


Figura 133 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO20

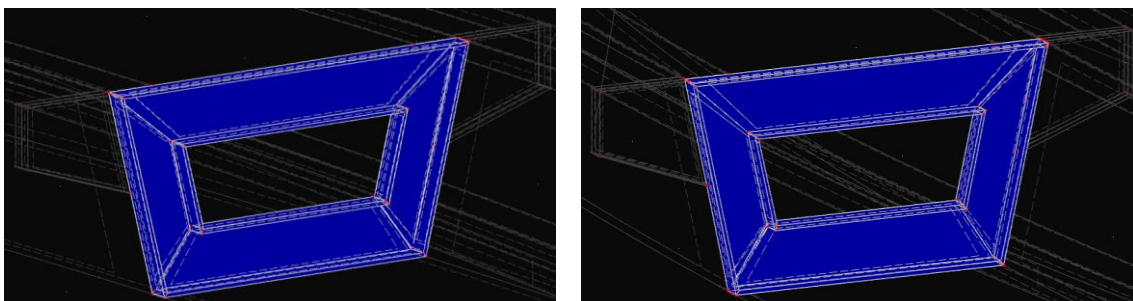


Figura 134 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO21

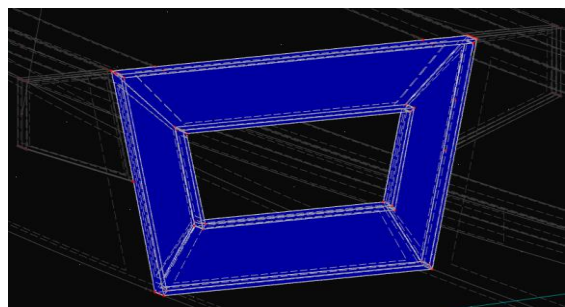
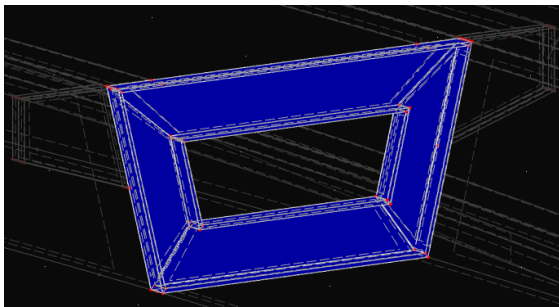


Figura 135 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO22

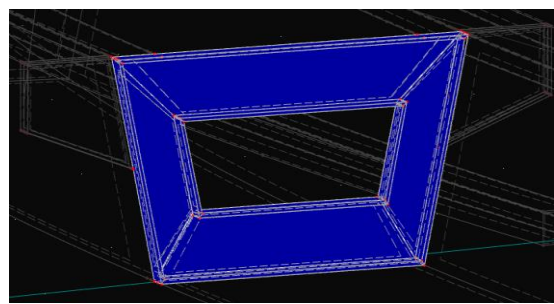
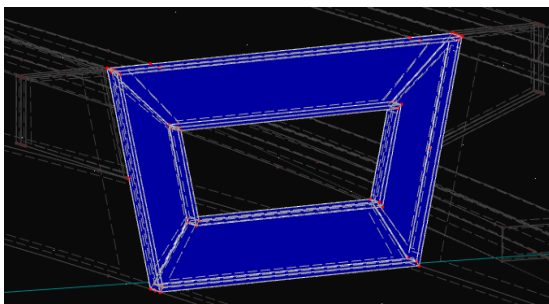


Figura 136 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO23

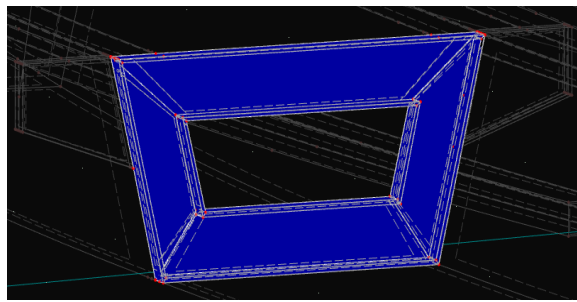
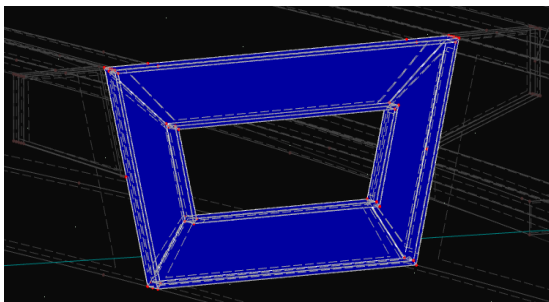


Figura 137 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO24

- Mástil

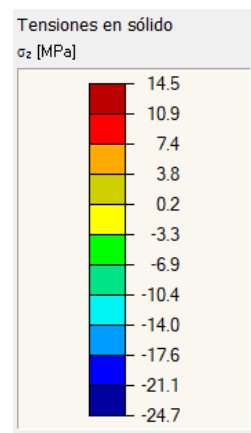


Figura 138 – Mapa de distribución de tensiones en superficies del mástil

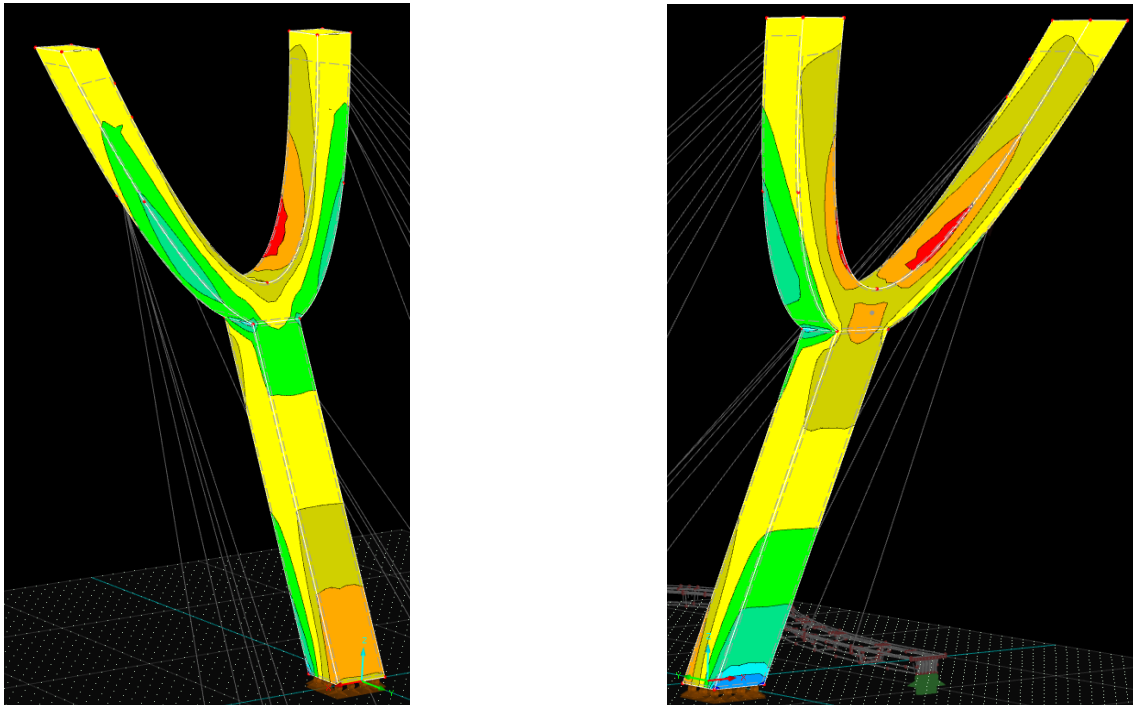


Figura 139 – Tensiones máximas en el mástil para CO13

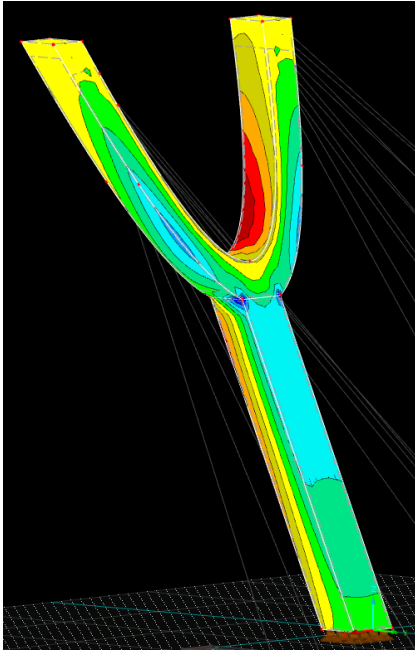


Figura 140 – Tensiones máximas en el mástil para CO14

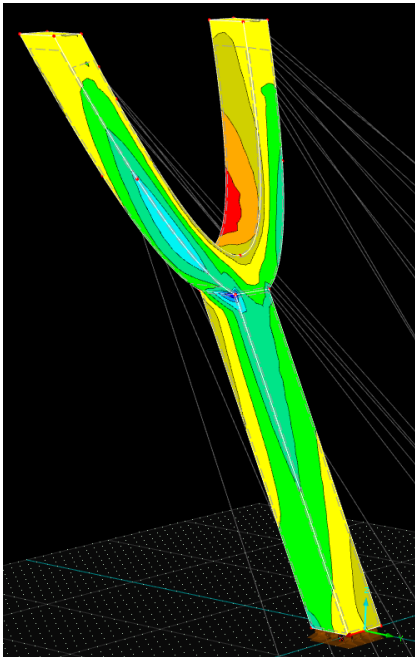
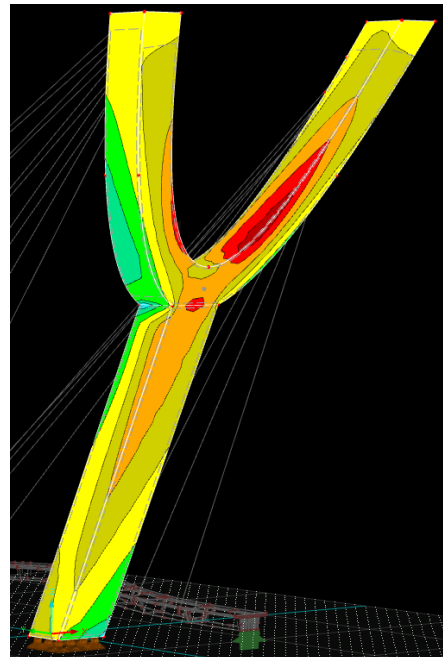


Figura 141 – Tensiones máximas en el mástil para CO15



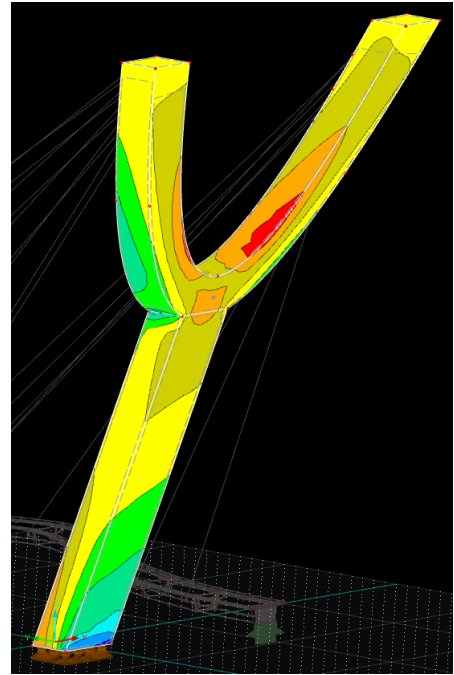
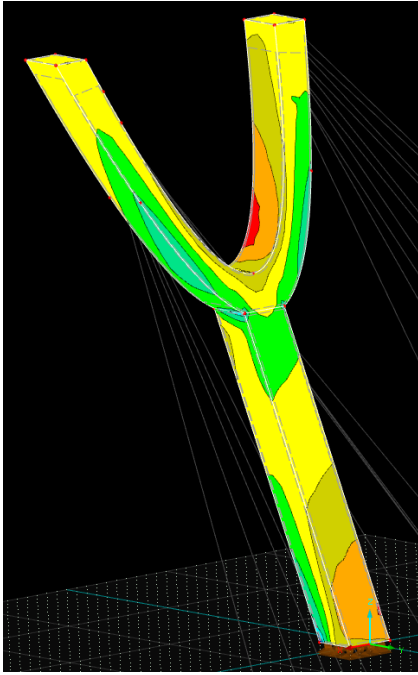


Figura 142 – Tensiones máximas en el mástil para CO16

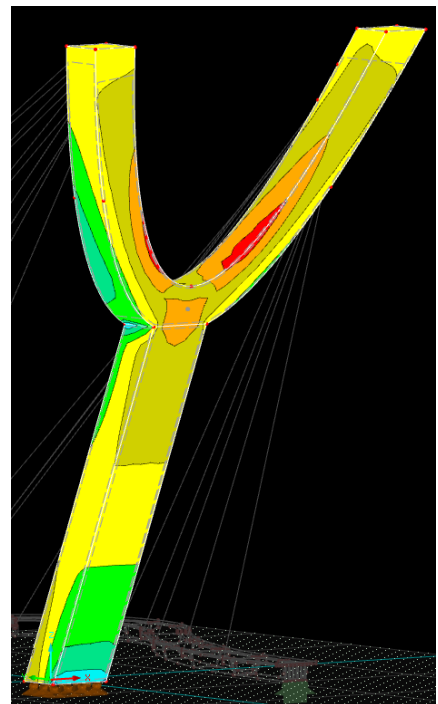
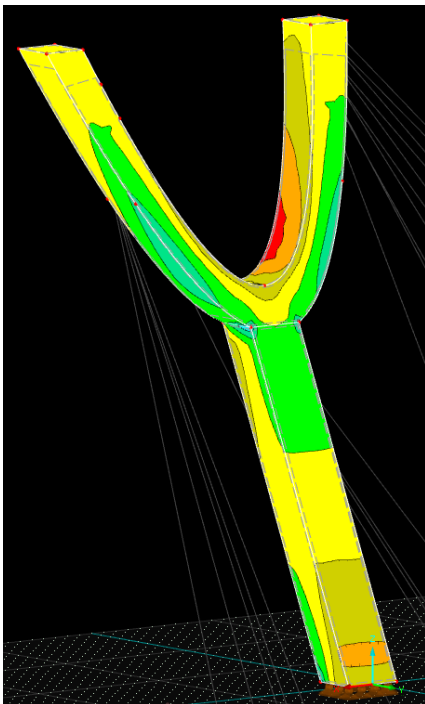


Figura 143 – Tensiones máximas en el mástil para CO17

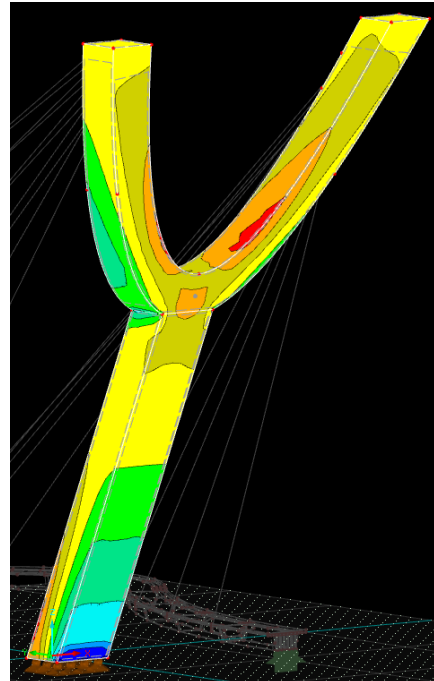
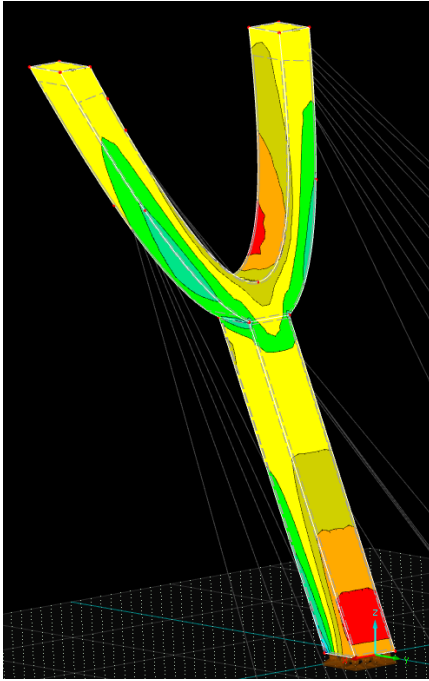


Figura 144 – Tensiones máximas en el mástil para CO18

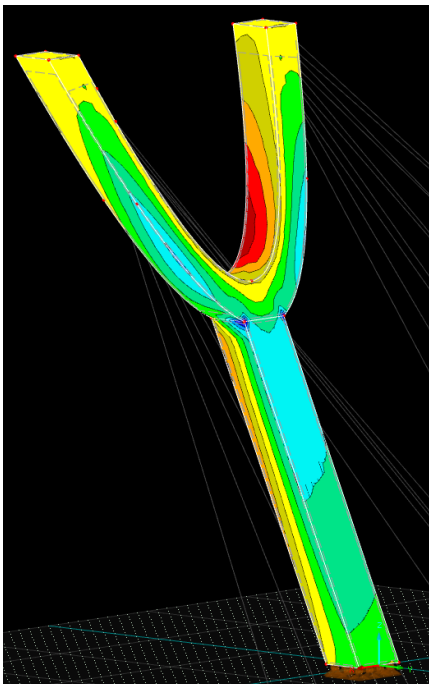


Figura 145 – Tensiones máximas en el mástil para CO19

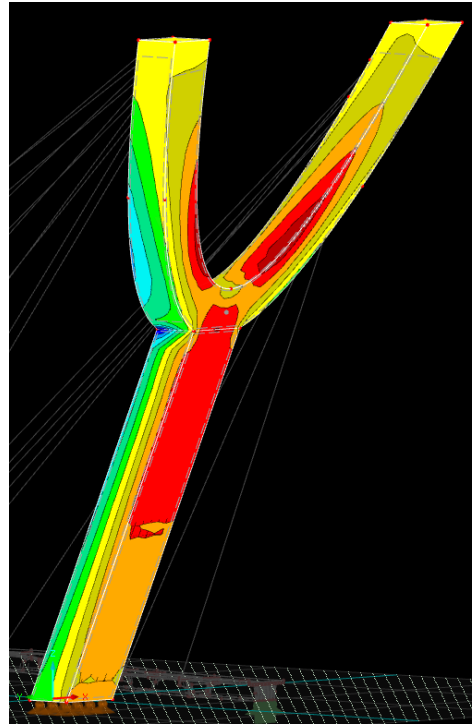
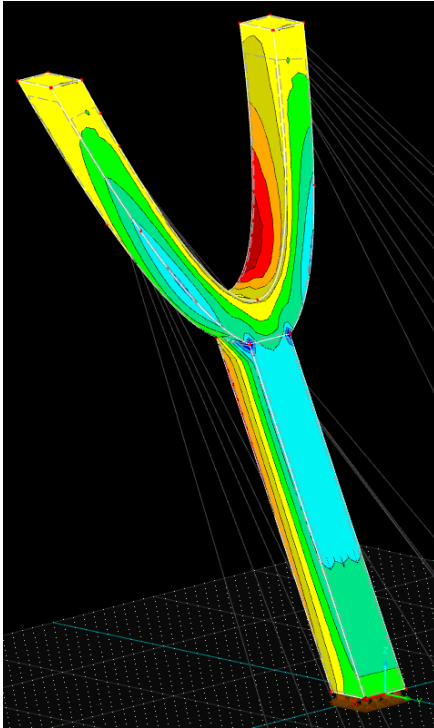


Figura 146 – Tensiones máximas en el mástil para CO20

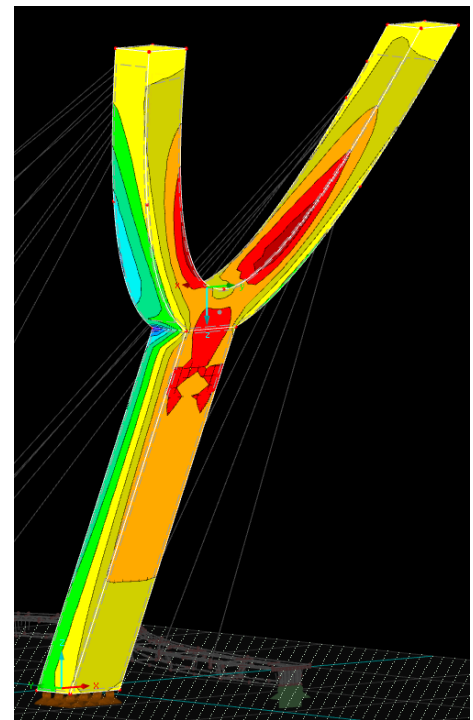
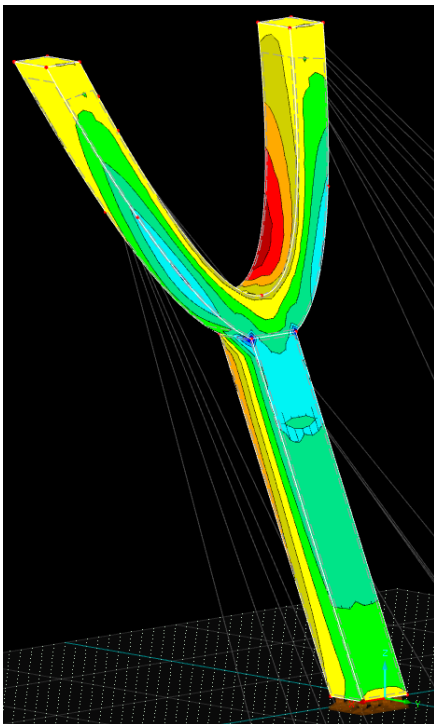


Figura 147 – Tensiones máximas en el mástil para CO21

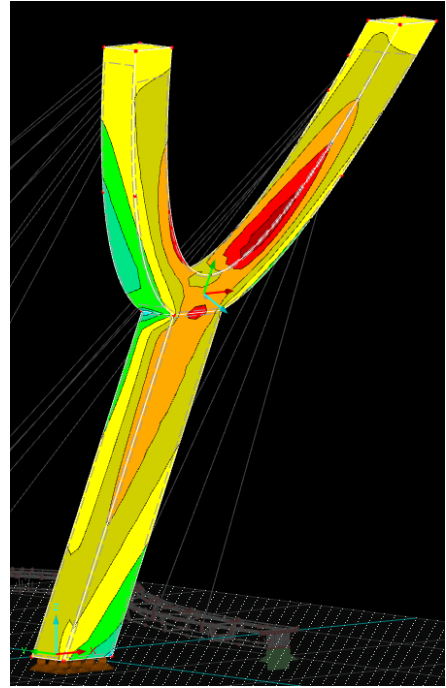
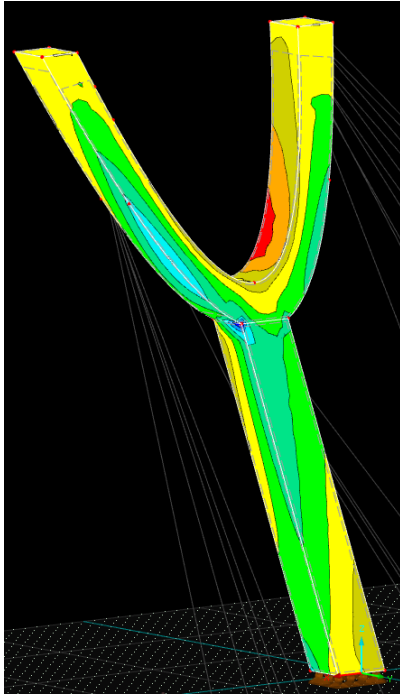


Figura 148 – Tensiones máximas en el mástil para CO22

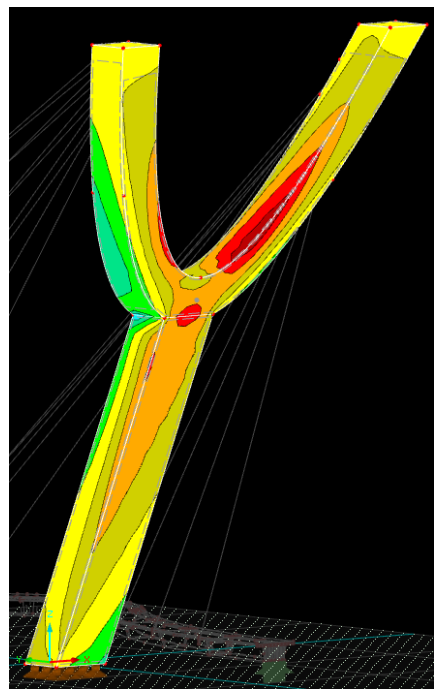
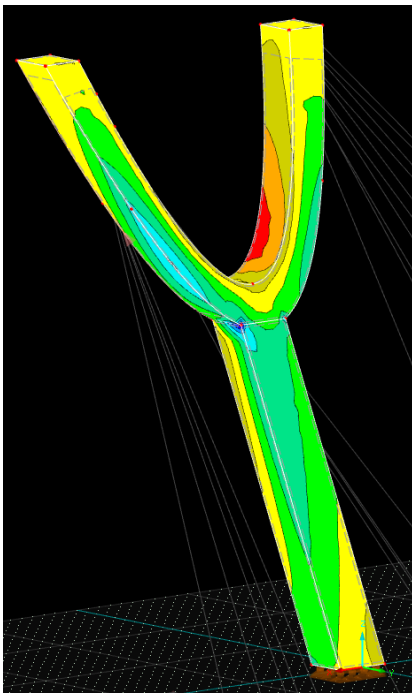


Figura 149 – Tensiones máximas en el mástil para CO23

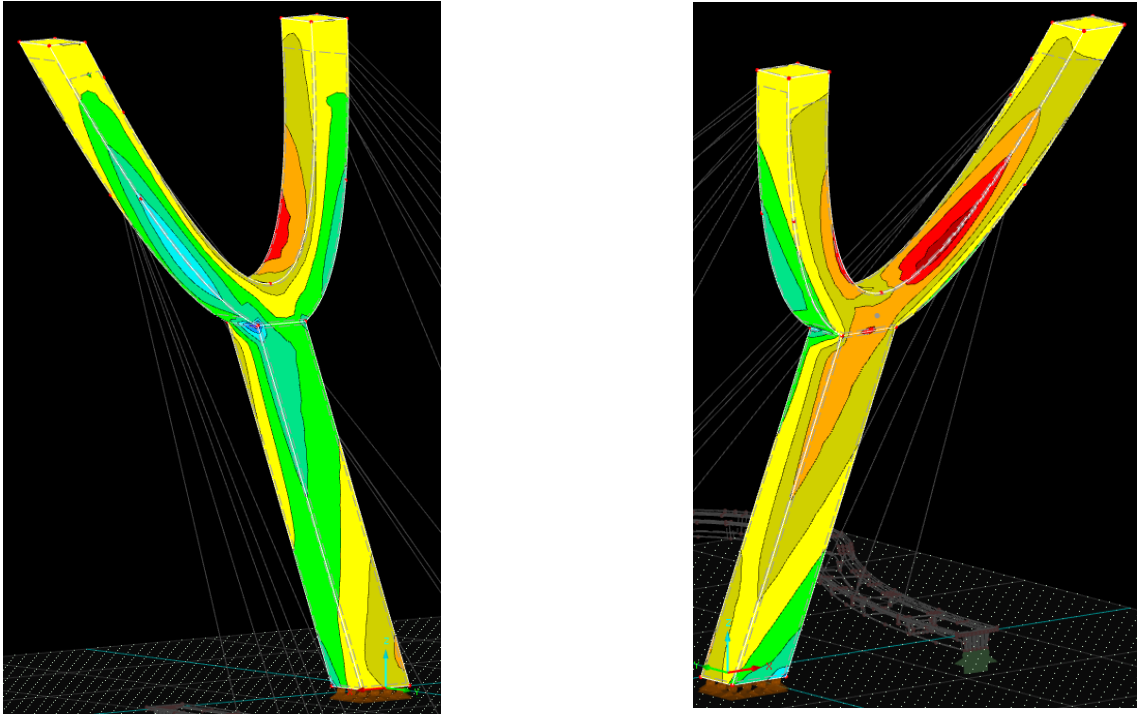


Figura 150 – Tensiones máximas en el mástil para CO24

- Esfuerzos axiales tirantes

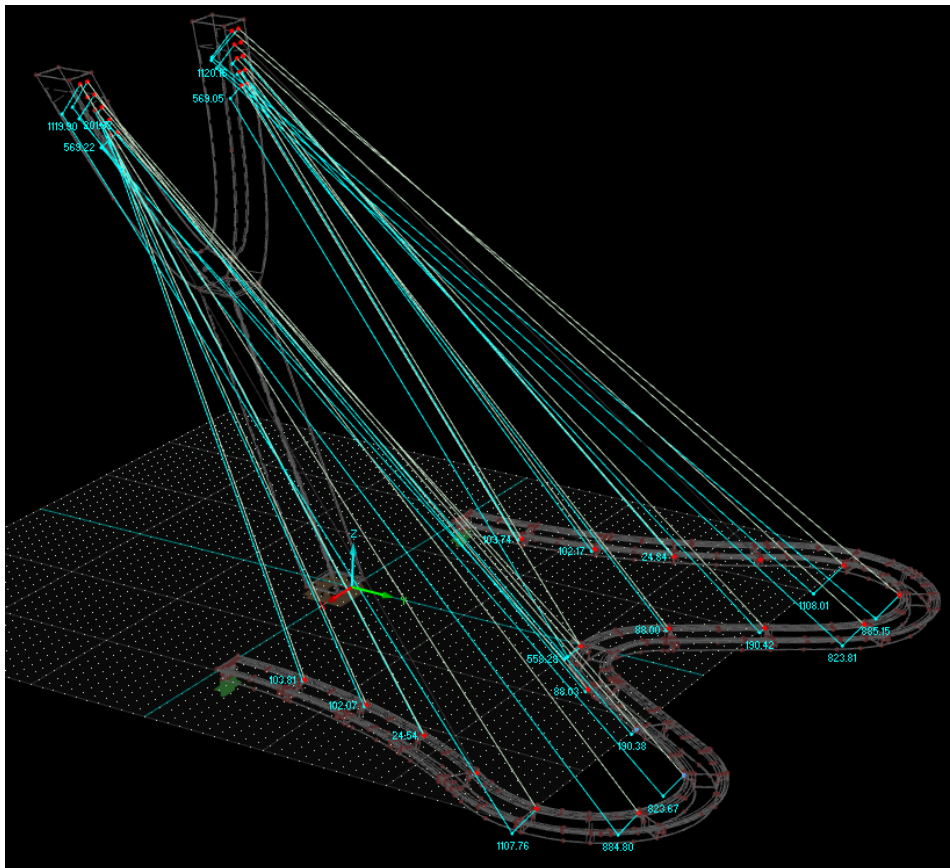


Figura 151 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO13

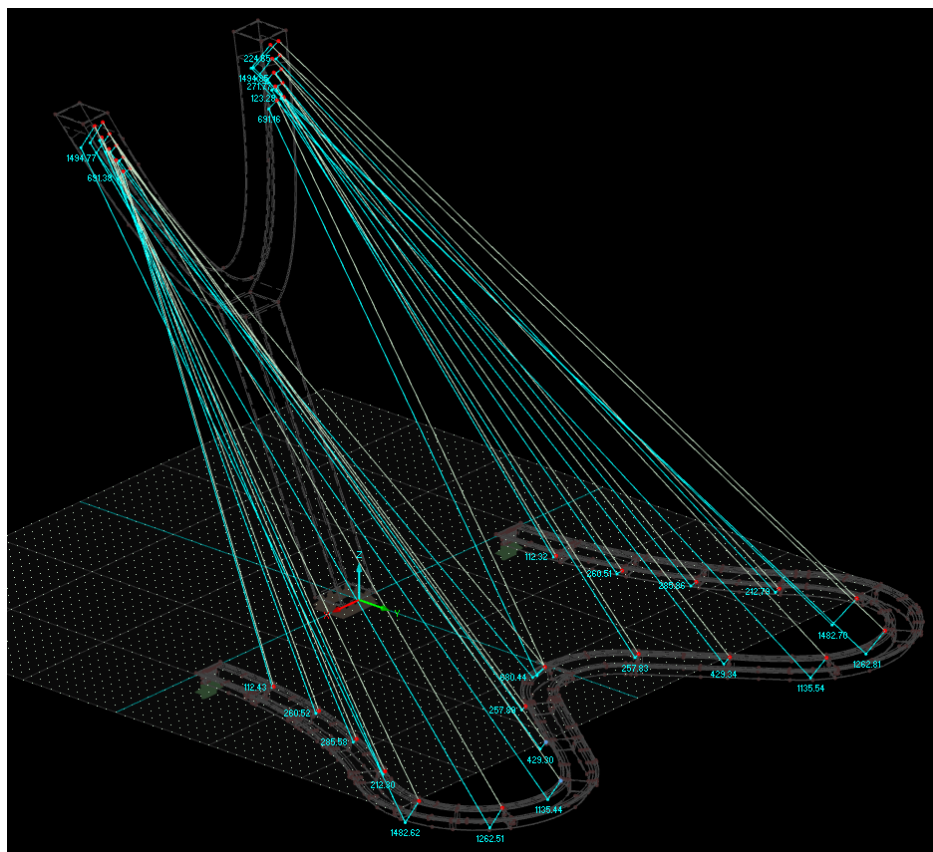


Figura 152 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO14

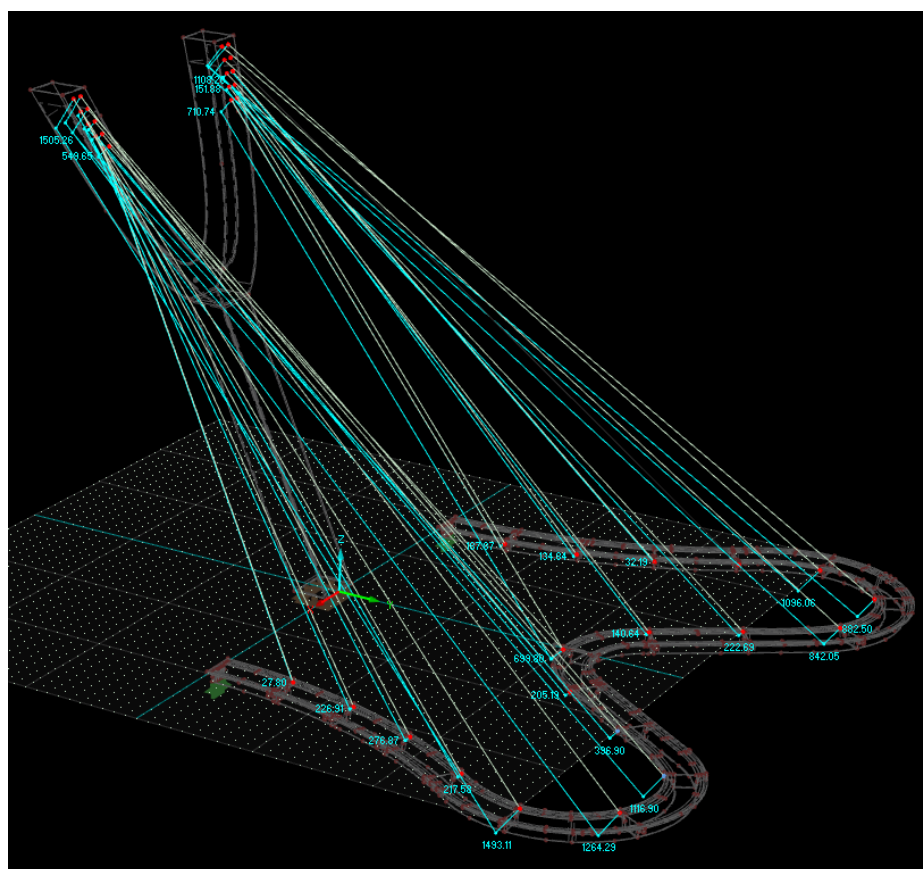


Figura 153 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO15

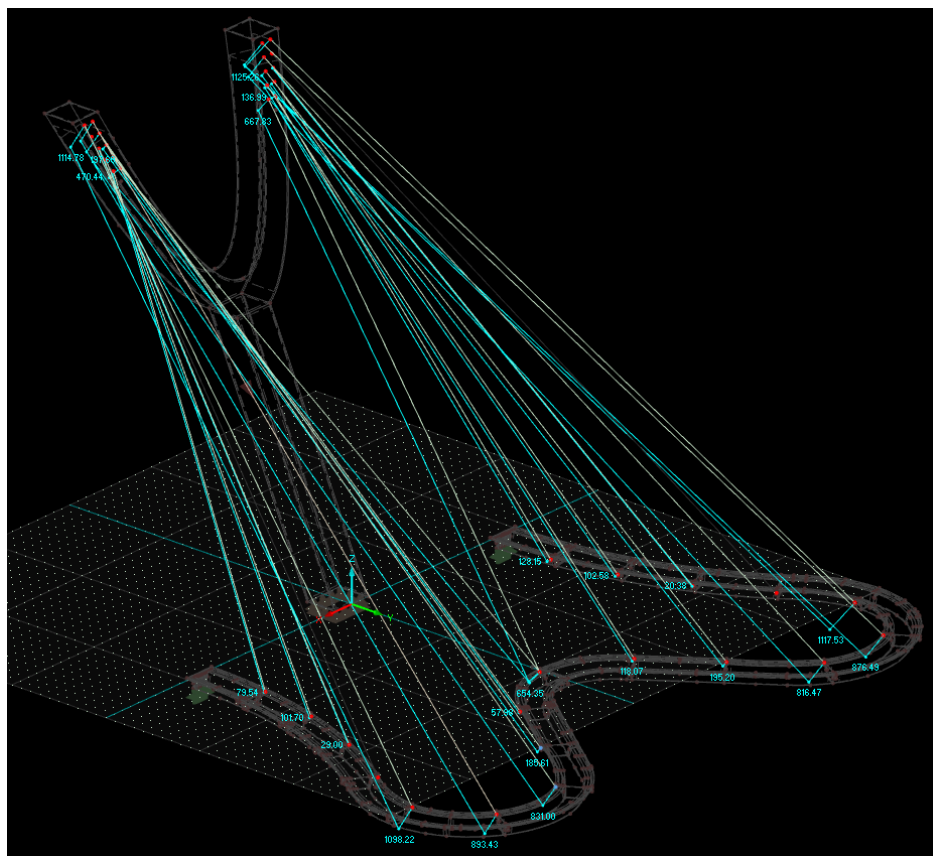


Figura 154 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO16

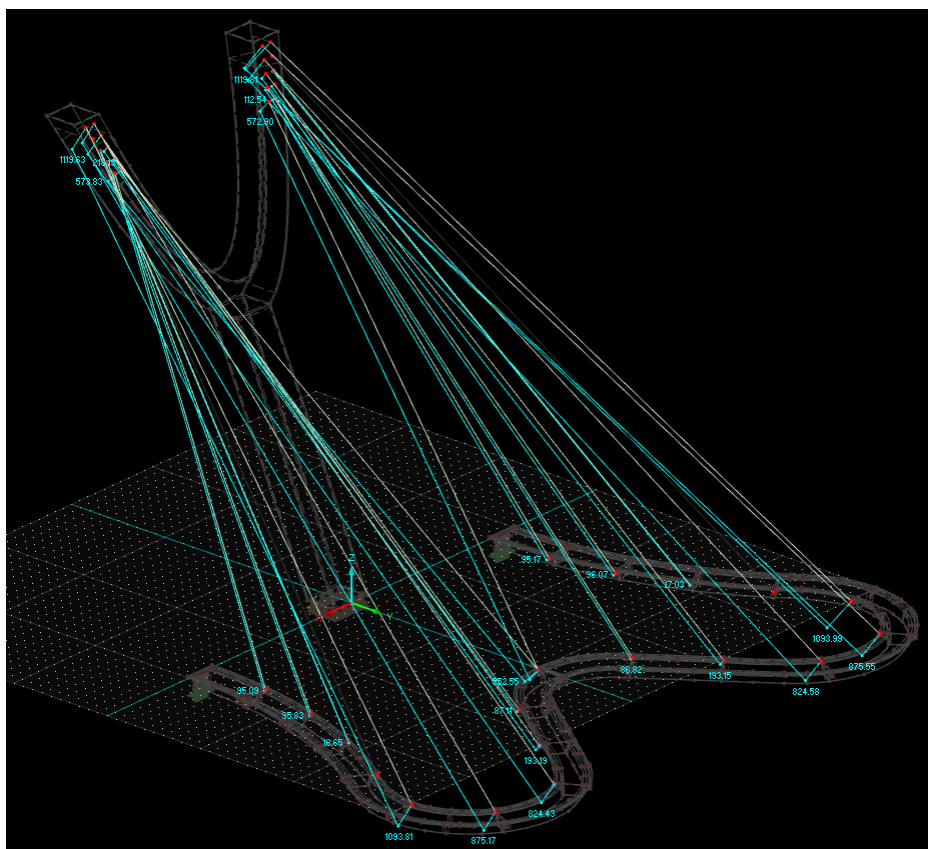


Figura 155 – Esfuerzos en los axiles para CO17

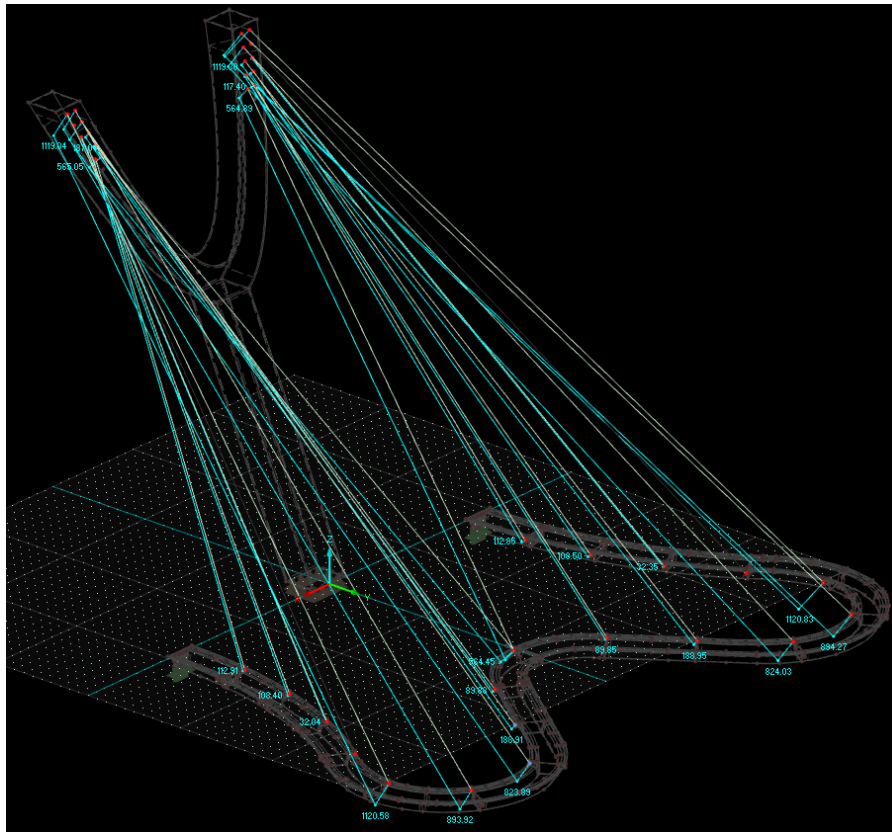


Figura 156 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO18

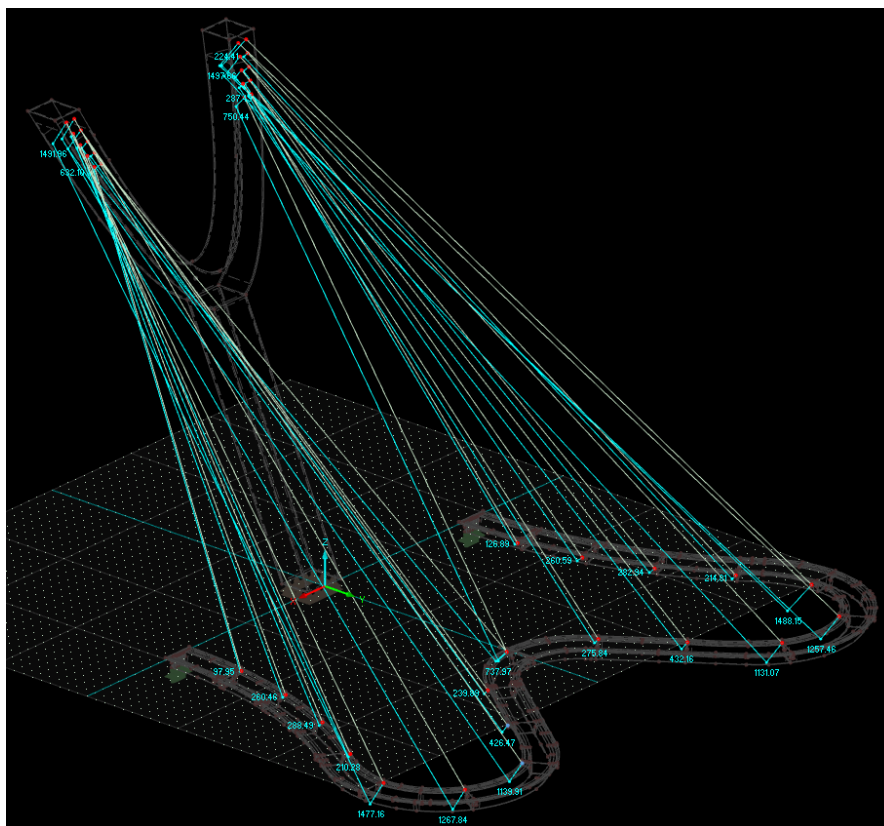
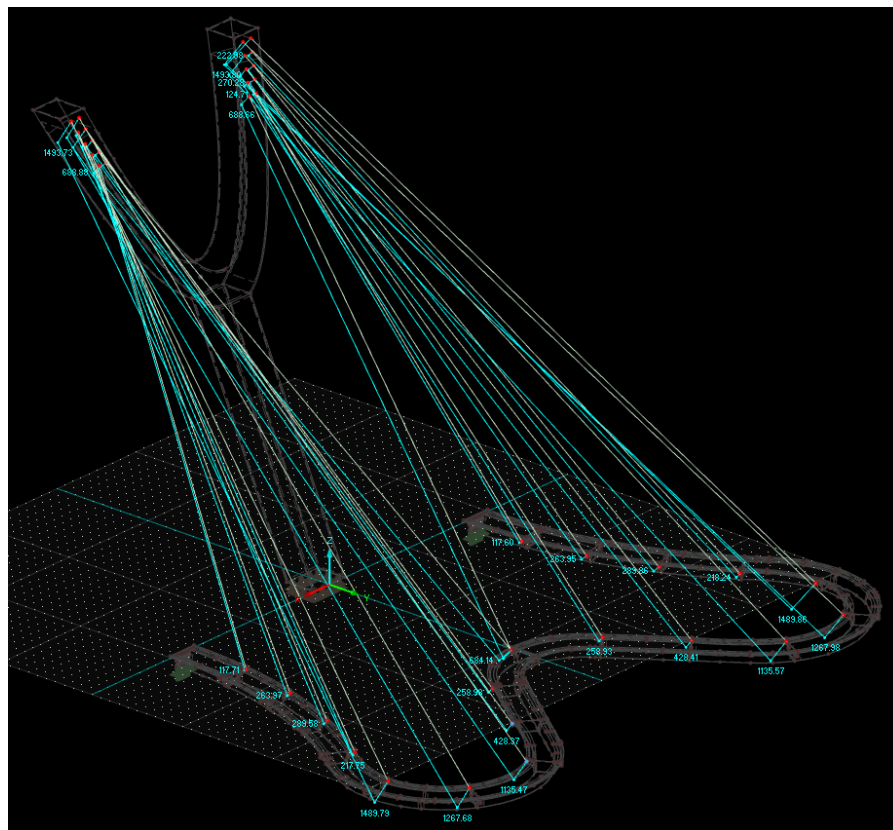
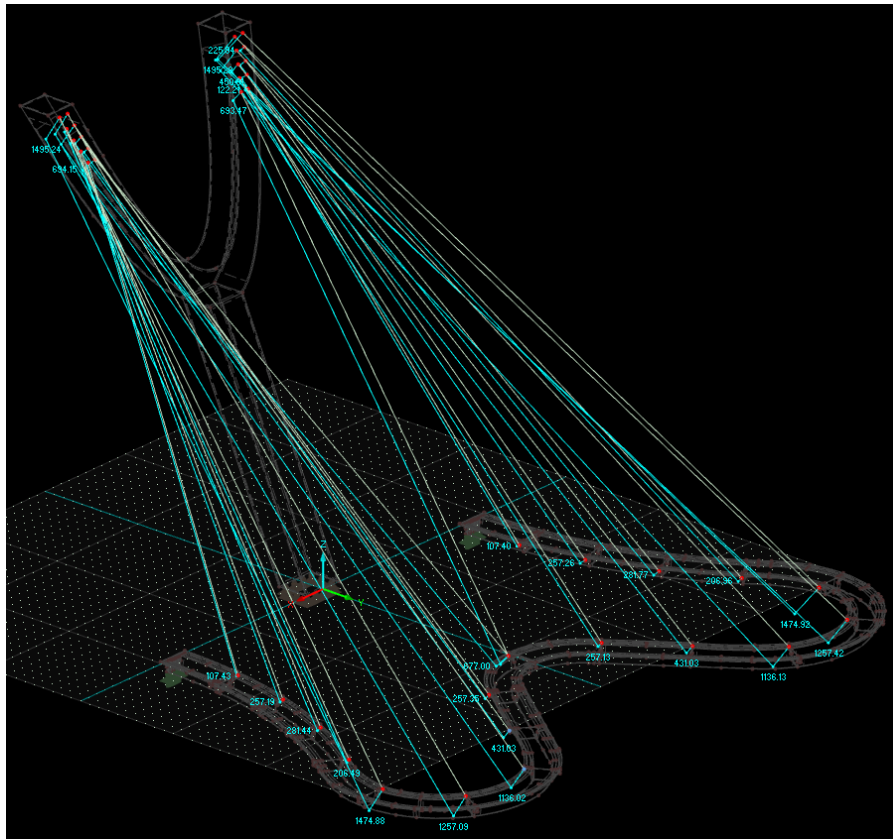


Figura 157 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO19



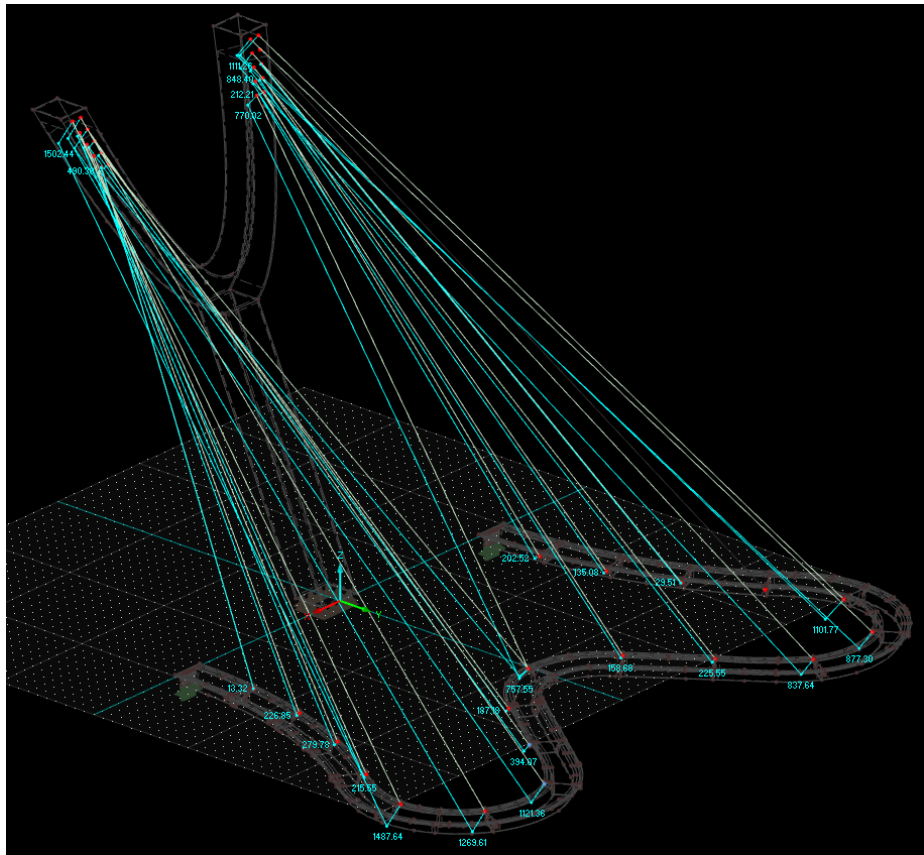


Figura 160 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO22

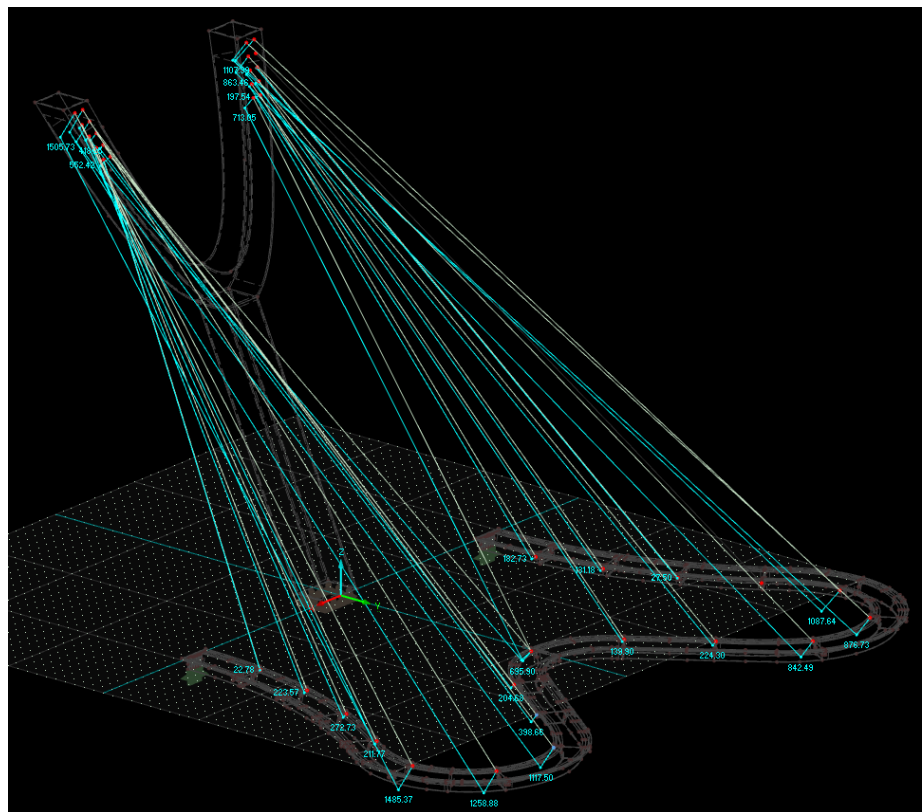


Figura 161 – Esfuerzos axiales en los tirantes para CO23

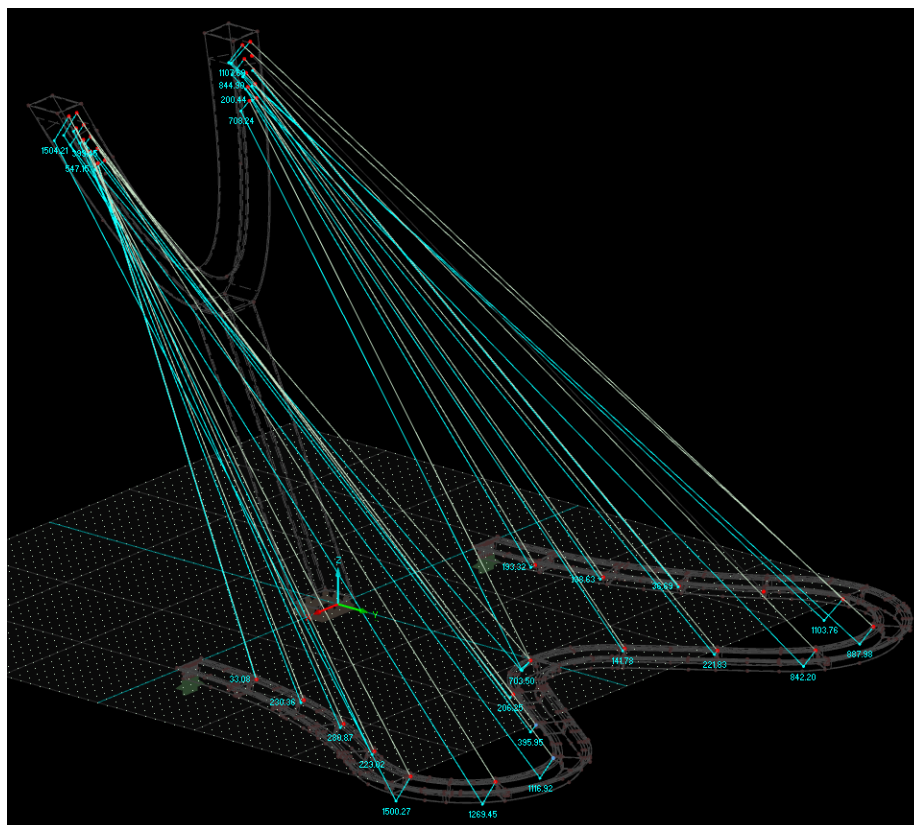
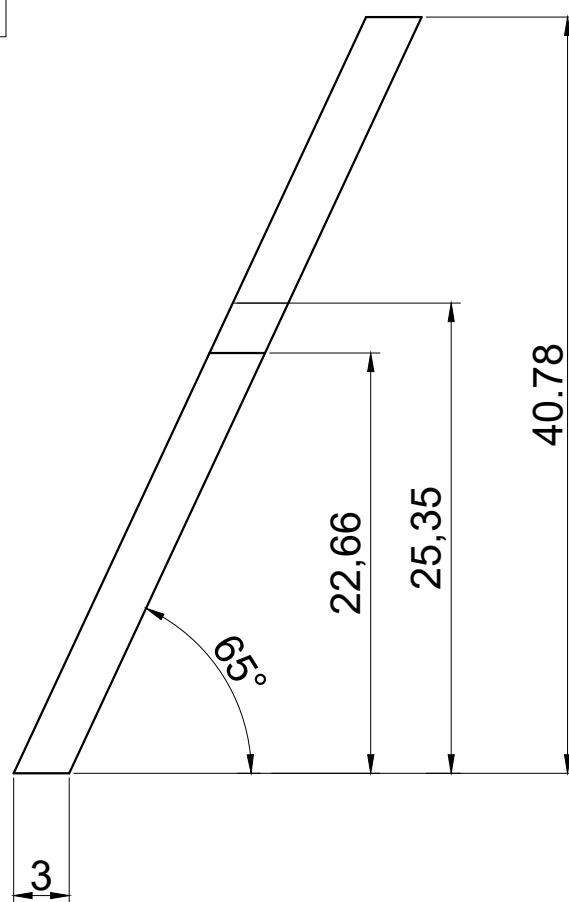
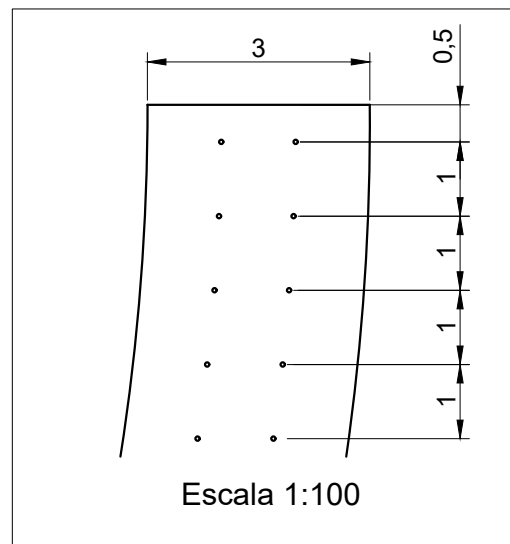
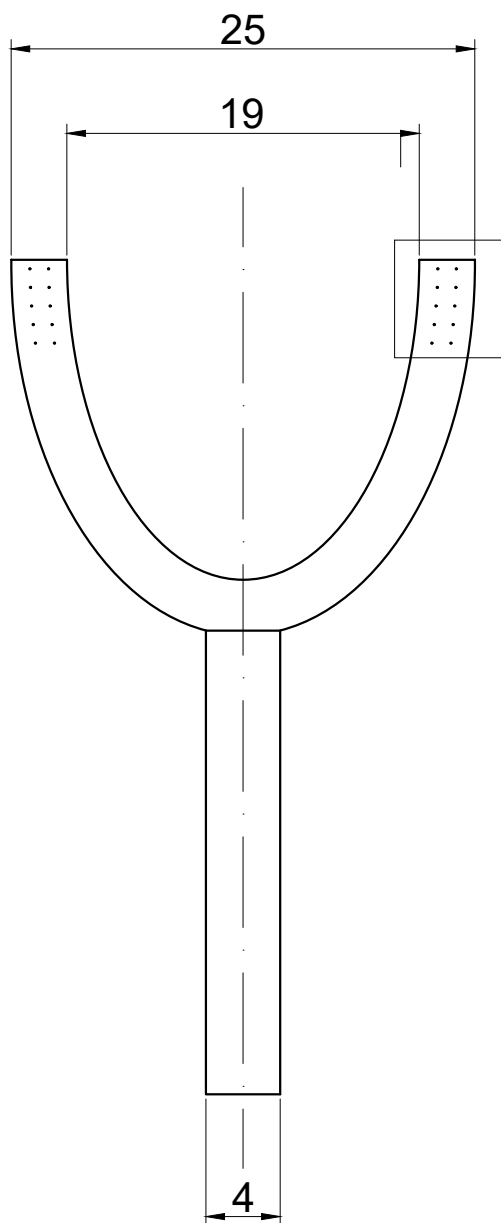


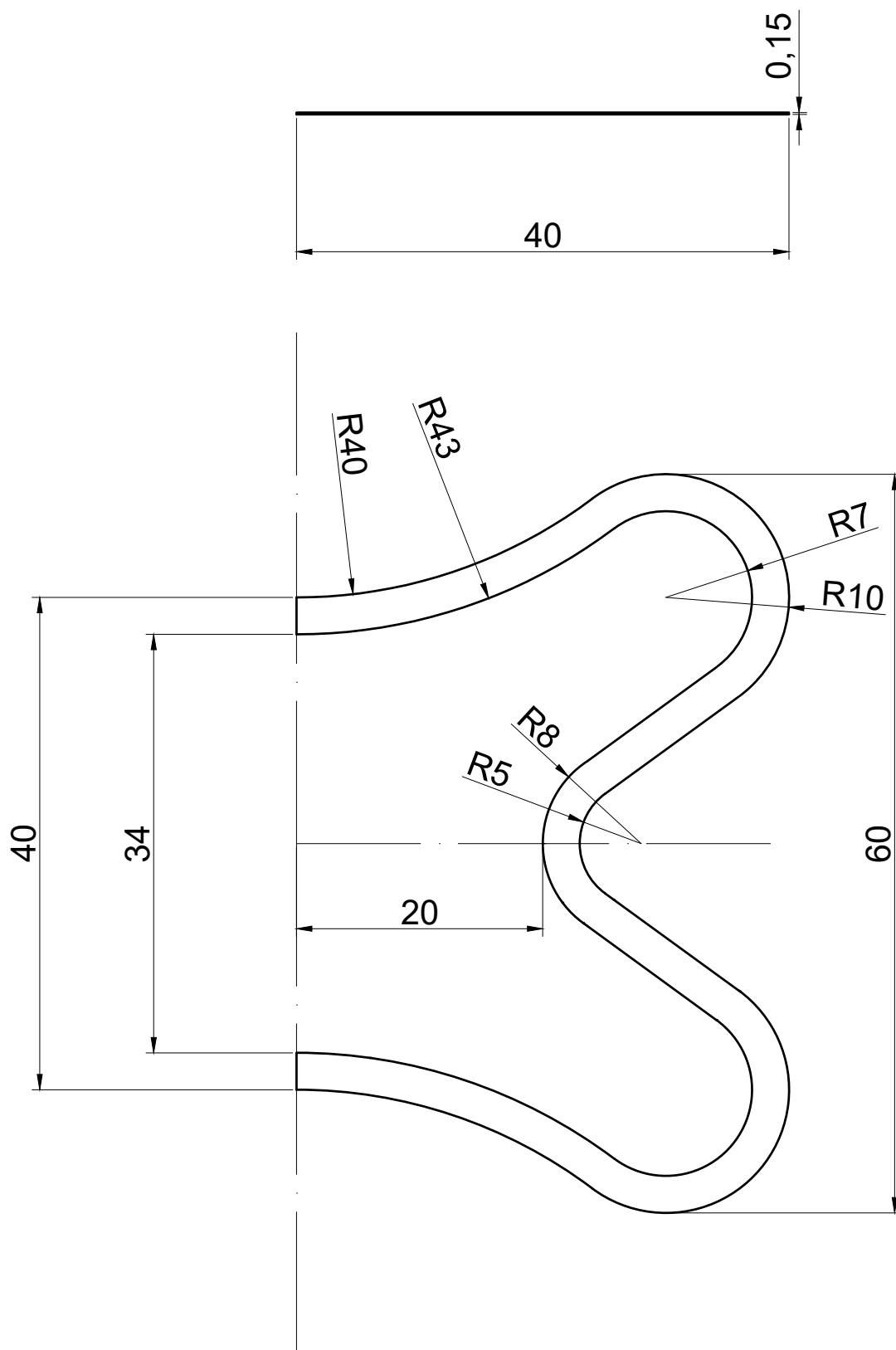
Figura 162 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO24

PLANOS



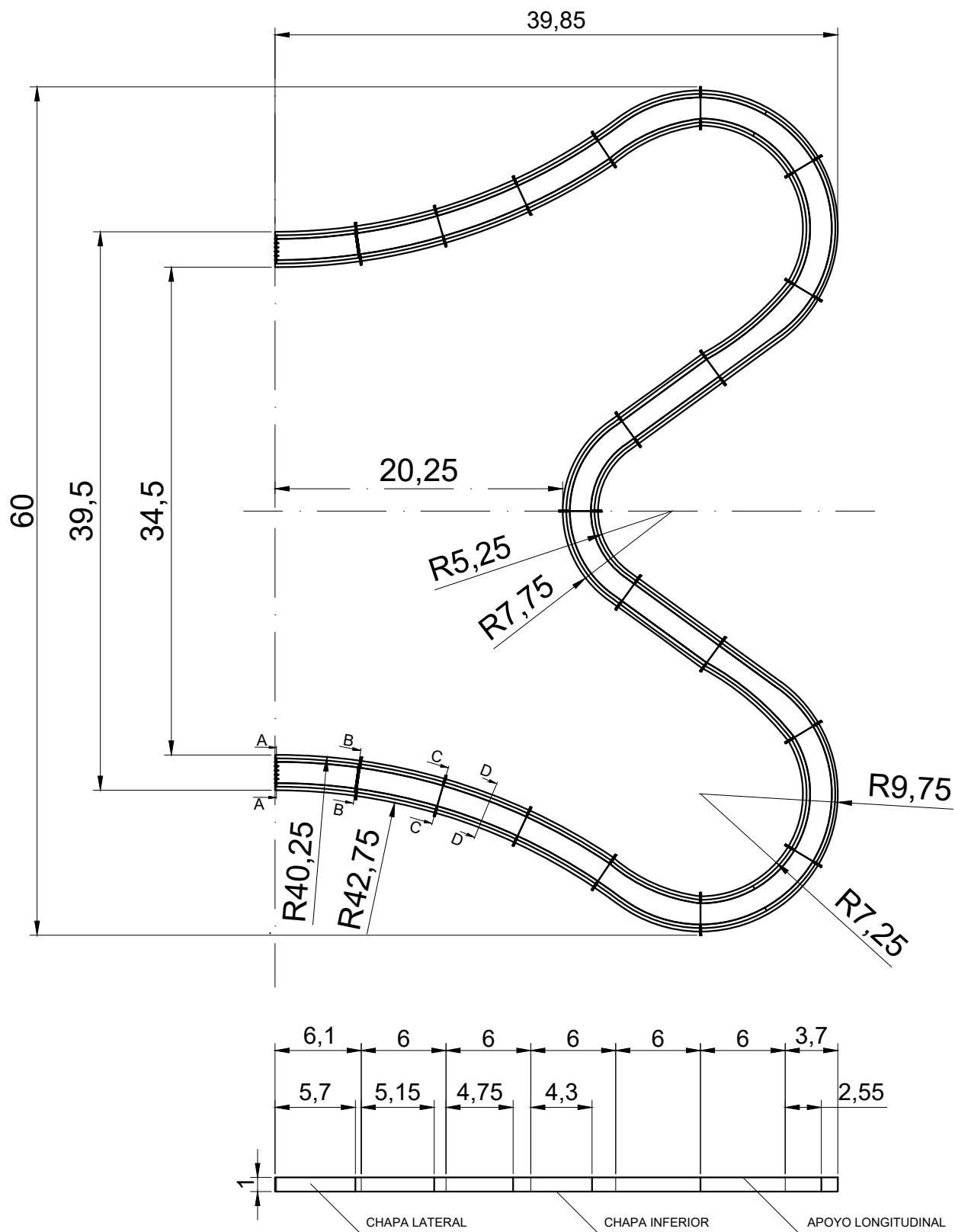
Ø 60 mm
Material: Hormigón C30/37
Cotas en metros (m)

	Fecha	Nombre	Firma	Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza
Dibujado	01/09/2020	MARÍA RUIZ ZARZA		
Comprobado				
Escala	Título MÁSTIL			Nº Plano 1
1 : 400	Proyecto MIRADOR EN VOLADIZO ATIRANTADO A UN MÁSTIL			Curso 2019 - 2020



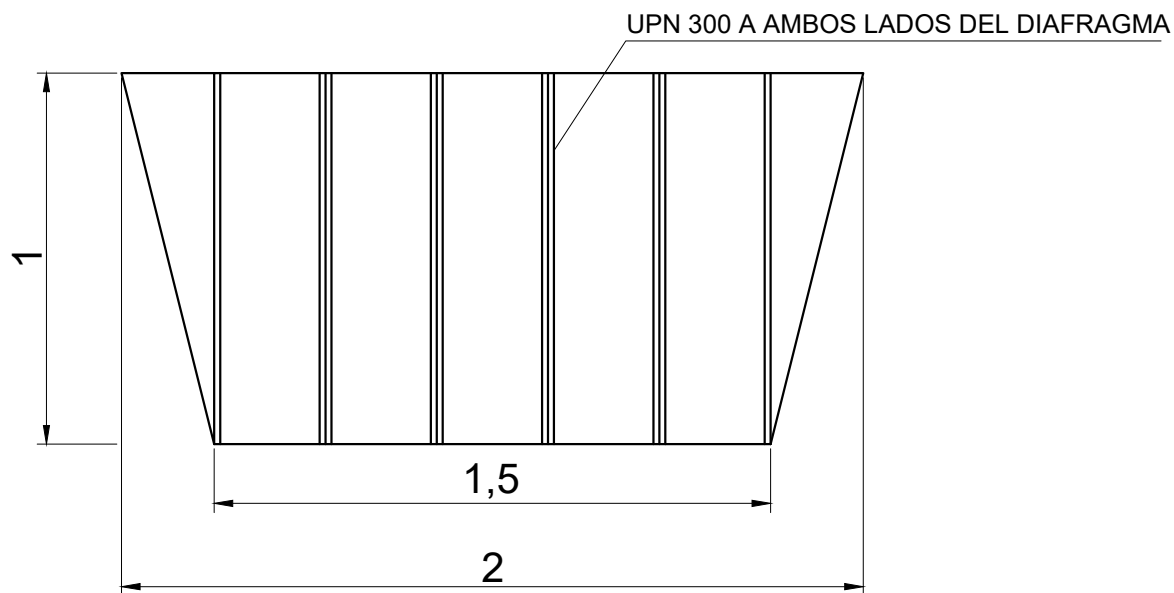
Material: Hormigón C30/37
Cotas en metros (m)

	Fecha	Nombre	Firma	Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza
Dibujado	01/09/2020	MARÍA RUIZ ZARZA		
Comprobado				
Escala	Título TABLERO			Nº Plano 2
1 : 500	Proyecto MIRADOR EN VOLADIZO ATIRANTADO A UN MÁSTIL			Curso 2019 - 2020

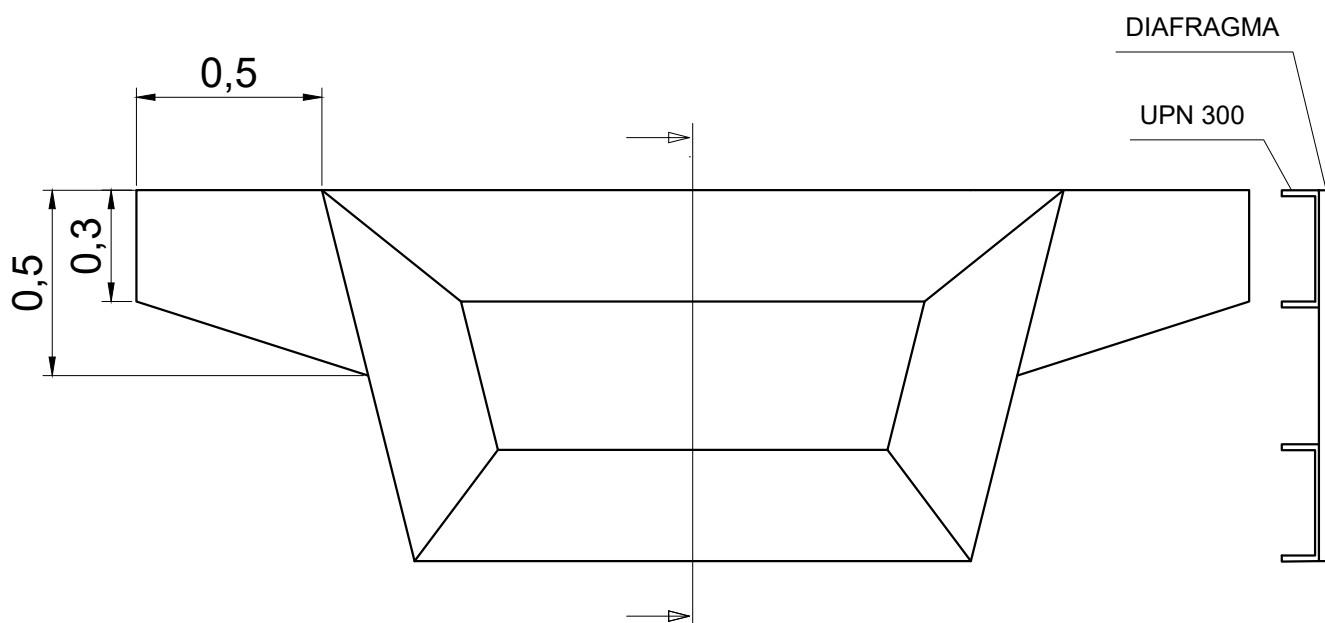


Material: Acero S 420 N
 Espesores de 40 mm
 Cotas en metros (m)

	Fecha	Nombre	Firma	Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza
Dibujado	01/09/2020	MARÍA RUIZ ZARZA		
Comprobado				
Escala	Título CAJÓN METÁLICO			Nº Plano 3
1 : 400	Proyecto MIRADOR EN VOLADIZO ATIRANTADO A UN MÁSTIL			Curso 2019 - 2020



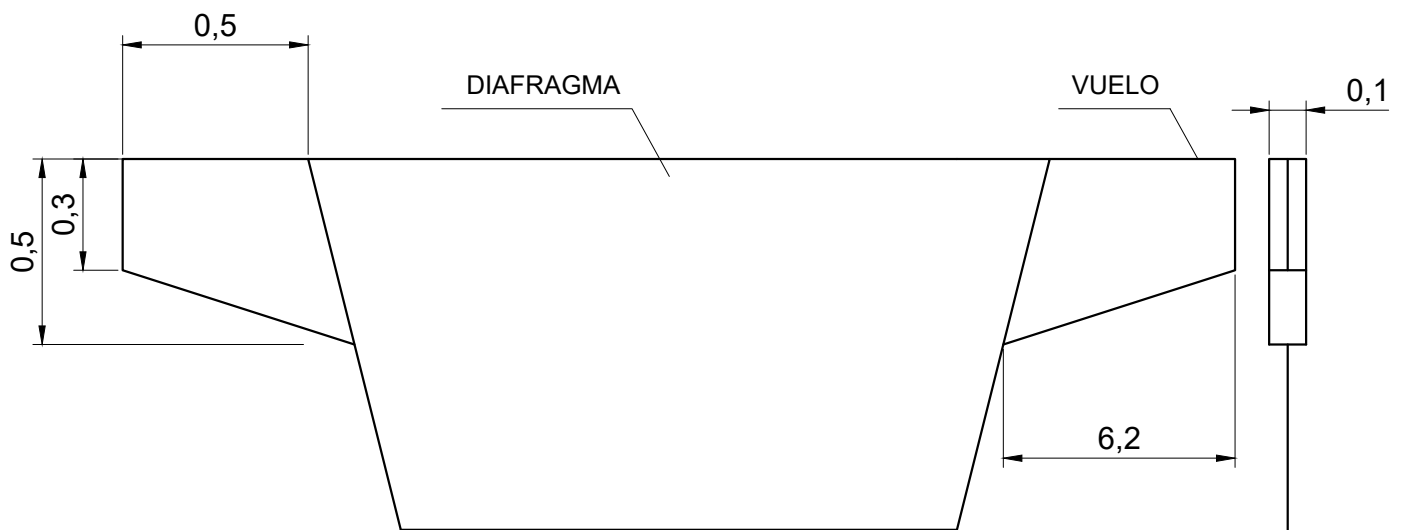
Sección A-A



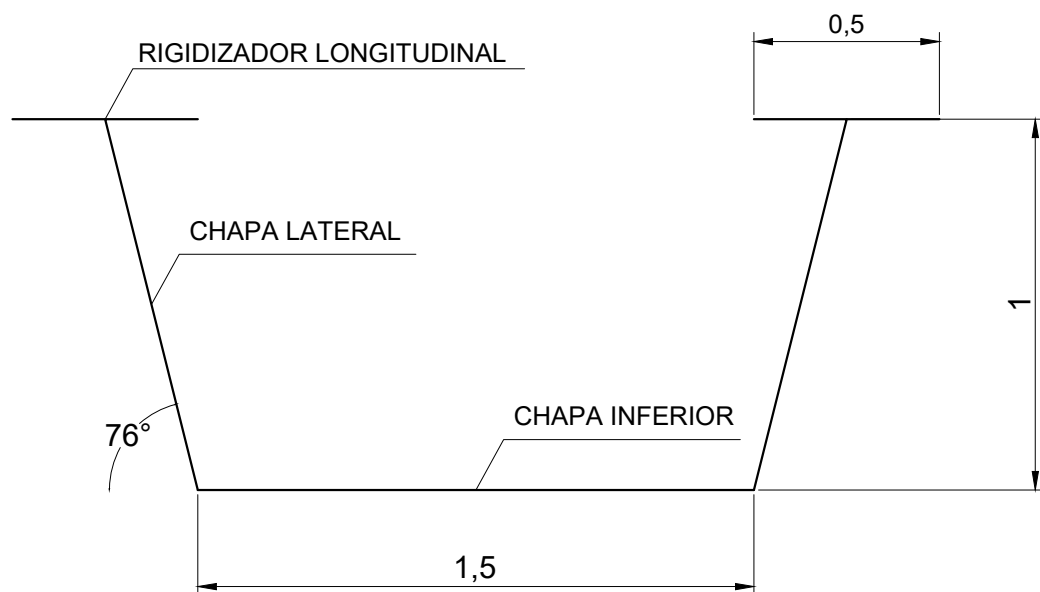
Sección B-B

Material: Acero S 420 N
Espesores de 40 mm
Cotas en metros (m)

	Fecha	Nombre	Firma	Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza
Dibujado	01/09/2020	MARÍA RUIZ ZARZA		
Comprobado				
Escala 1 : 20	Título DIAFRAGMAS CON RIGIDIZADORES DEL CAJÓN METÁLICO			Nº Plano 3.1
	Proyecto MIRADOR EN VOLADIZO ATIRANTADO A UN MÁSTIL			Curso 2019 - 2020



Sección C-C



Sección D-D

Material: Acero S 420 N
Espesores de 40 mm
Cotas en metros (m)

	Fecha	Nombre	Firma	Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza
Dibujado	01/09/2020	MARÍA RUIZ ZARZA		
Comprobado				
Escala	Título DIAFRAGMAS DEL CAJÓN METÁLICO		Nº Plano 3.2	
1 : 20	Proyecto MIRADOR EN VOLADIZO ATIRANTADO A UN MÁSTIL		Curso 2019 - 2020	

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pasarela del voluntariado
https://es.wikipedia.org/wiki/Pasarela_del_Voluntariado
- [2] Imagen pasarela del voluntariado
[https://es.wikipedia.org/wiki/Pasarela_del_Voluntariado#/media/Archivo:Pasarela del Voluntariado Zaragoza.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Pasarela_del_Voluntariado#/media/Archivo:Pasarela_del_Voluntariado_Zaragoza.jpg)
- [3] Puente del Alamillo
<https://www.sevillaguia.com/sevillaguia/puentes/alamillo.htm>
- [4] Imagen puente del Alamillo
<https://ingenieriaenlared.files.wordpress.com/2007/09/alamillo1.jpg>
- [5] Sky Bridge en Langkawi
<https://noticias.arg.com.mx/Detalles/10606.html#.X148iGgzZPY>
- [6] Grand Canyon Skywalk
<http://www.revistavector.com.mx/2019/07/16/pasarela-del-gran-canon/>
- [7] Mirador en el Parque Nacional de Longgang
<https://www.abc.es/viajar/20150524/abci-yuanduan-201505221348.html?ref=https:%2F%2Fwww.google.com%2F>
- [8] Imagen del mirador en el Parque Nacional de Longgang
<https://www.elmundo.es/internacional/2018/06/15/5b235806ca474132298b45de.html>
- [9] Norma IAP-11
<https://www.aulacarreteras.com/wp-content/uploads/2019/10/IAP-11.pdf>
- [10] Instrucción de Acero Estructural (EAE)
<http://www.carreteros.org/normativa/estructuras/eae/eae.pdf>
- [11] Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)
<http://www.ponderosa.es/docs/Norma-EHE-08.pdf>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Cargas de viento	16
Tabla 2 – Factores de simultaneidad	18
Tabla 3 – Coeficientes parciales para las acciones (ELS)	18
Tabla 4 – Combinación de cargas ELS	19
Tabla 5 – Combinación de cargas ELS para la temperatura	19
Tabla 6 – Coeficientes parciales para las comprobaciones resistentes	19
Tabla 7 – Combinación de cargas ELU	20
Tabla 8 – Desplazamientos u_z del mirador	21
Tabla 9 – Desplazamientos u_x del mirador debido a la temperatura	21
Tabla 10 – Tensión máxima de Von Misses	22
Tabla 11 – Tensión máxima de Von Misses en los rigidizadores	22
Tabla 12 – Tensiones máximas de compresión en el mástil	23
Tabla 13 – Esfuerzos axiles en los tirantes	23
Tabla 14 – Cargas de viento en los laterales del cajón	31
Tabla 15 – Cargas de viento en el tablero	32
Tabla 16 – Cargas de viento en la barandilla	33
Tabla 17 – Cargas de viento en el mástil	35

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1 – Acción del viento	30
Ec. 2 – Acción del viento en los tirantes	36
Ec. 3 – Sobrecarga de nieve	37
Ec. 4 – Combinación fundamental para las comprobaciones en ELU	39
Ec. 5 – Combinación fundamental para las comprobaciones en ELS	40
Ec. 6 – Resistencia del hormigón a compresión	42
Ec. 7 – Tensión máxima admisible del acero	42
Ec. 8 – Esfuerzo axil máximo admisible de cada tirante	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Pasarela del voluntariado (Zaragoza)	8
Figura 2 – Puente del Alamillo (Sevilla)	8
Figura 3 – Sky Bridge en Langkawi (Malasia)	9
Figura 4 – Grand Canyon Skywalk (Colorado)	9
Figura 5 – Vista en planta del mirador en el Parque Nacional de Longgang (China)	10
Figura 6 – Modelo del tablero en RFEM	12
Figura 7 – Modelo del cajón metálico en RFEM	13
Figura 8 – Ampliación del modelo del cajón metálico en RFEM	13
Figura 9 – Modelo del mástil en RFEM	13
Figura 10 – Sección de los cables de pretensado	14
Figura 11 – Distribución de la carga de pretensado en los tirantes	16
Figura 12 – Sobrecarga de uso total y parcial	17
Figura 13 – Carga permanente debida a la barandilla	17
Figura 14 – Flecha máxima	21
Figura 15 – Constantes del hormigón C30/37	26
Figura 16 – Constantes del acero S 420 N	26
Figura 17 – Constantes del cable de pretensar St 1600/1860	27
Figura 18 – Parámetros de malla	28
Figura 19 – Apoyo con desplazamiento en u_x	30
Figura 20 – Coeficientes eólicos (extraído del CTE)	30
Figura 21 – Cargas de presión y succión en dirección + X en laterales del cajón	31
Figura 22 – Cargas de presión y succión en dirección + Y en laterales del cajón	31
Figura 23 – Cargas de presión y succión en dirección - Y en laterales del cajón	32
Figura 24 – Cargas de presión y succión en dirección + X en tablero	32
Figura 25 – Cargas de presión y succión en dirección + Y en tablero	33
Figura 26 – Cargas de presión y succión en dirección - Y en tablero	33
Figura 27 – Cargas de presión y succión en dirección + X debidas a la barandilla	34
Figura 28 – Cargas de presión y succión en dirección + Y debidas a la barandilla	34
Figura 29 – Cargas de presión y succión en dirección - Y debidas a la barandilla	34
Figura 30 – Cargas de presión y succión en dirección + X en el mástil	35
Figura 31 – Cargas de presión y succión en dirección + Y en el mástil	35
Figura 32 – Cargas de presión y succión en dirección - Y en el mástil	35
Figura 33 – Cargas de viento en dirección + X en los tirantes	36
Figura 34 – Cargas de viento en dirección + Y en los tirantes	36
Figura 35 – Cargas de viento en dirección - Y en los tirantes	37

Figura 36 – Zonas climáticas de invierno (según Norma IAP-11 y CTE)	38
Figura 37 – Sobrecarga de nieve (según norma IAP-11 y CTE)	38
Figura 38 – Factores de simultaneidad ψ	39
Figura 39 – Coeficientes parciales para las acciones (ELU)	40
Figura 40 – Coeficientes parciales para las acciones (ELS)	41
Figura 41 – Desplazamiento u_z para CO1	43
Figura 42 – Desplazamiento u_z para CO2	43
Figura 43 – Desplazamiento u_z para CO3	44
Figura 44 – Desplazamiento u_z para CO4	44
Figura 45 – Desplazamiento u_z para CO5	45
Figura 46 – Desplazamiento u_z para CO6	45
Figura 47 – Desplazamiento u_z para CO7	46
Figura 48 – Desplazamiento u_z para CO8	46
Figura 49 – Desplazamiento u_z para CO9	47
Figura 50 – Desplazamiento u_z para CO10	47
Figura 51 – Desplazamiento u_z para CO11	48
Figura 52 – Desplazamiento u_z para CO12	48
Figura 53 – Mapa de distribución de tensiones en superficies de acero S 420 S	49
Figura 54 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO13	49
Figura 55 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO14	49
Figura 56 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO15	50
Figura 57 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO16	50
Figura 58 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO17	50
Figura 59 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO18	50
Figura 60 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO19	50
Figura 61 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO20	51
Figura 62 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO21	51
Figura 63 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO22	51
Figura 64 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO23	51

Figura 65 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales exteriores del cajón metálico para CO24	51
Figura 66 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO13	52
Figura 67 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO14	52
Figura 68 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO15	52
Figura 69 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO16	52
Figura 70 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO17	52
Figura 71 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO18	53
Figura 72 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO19	53
Figura 73 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO20	53
Figura 74 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO21	53
Figura 75 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO22	53
Figura 76 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO23	54
Figura 77 – Tensiones máximas de Von Mises en laterales interiores del cajón metálico para CO24	54
Figura 78 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO13	54
Figura 79 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO14	55
Figura 80 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO15	55
Figura 81 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO16	55
Figura 82 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO17	56
Figura 83 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO18	56
Figura 84 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO19	56

Figura 85 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO20	57
Figura 86 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO21	57
Figura 87 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO22	57
Figura 88 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO23	58
Figura 89 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO24	58
Figura 90 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO13	58
Figura 91 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO14	59
Figura 92 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO15	59
Figura 93 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO16	59
Figura 94 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO17	60
Figura 95 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO18	60
Figura 96 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO19	60
Figura 97 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO20	61
Figura 98 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO21	61
Figura 99 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO22	61
Figura 100 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO23	62
Figura 101 – Tensiones máximas de Von Mises en bases del cajón metálico para CO24	62
Figura 102 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO13	62
Figura 103 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO14	63
Figura 104 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO15	63

Figura 105 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO16	64
Figura 106 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO17	64
Figura 107 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO18	65
Figura 108 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO19	65
Figura 109 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO20	66
Figura 110 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO21	66
Figura 111 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO22	67
Figura 112 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO23	67
Figura 113 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores longitudinales del cajón metálico para CO24	68
Figura 114 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO13	68
Figura 115 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO14	69
Figura 116 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO15	69
Figura 117 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO16	70
Figura 118 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO17	70
Figura 119 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO18	71
Figura 120 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO19	71
Figura 121 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO20	72
Figura 122 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO21	72
Figura 123 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO22	73
Figura 124 – Tensiones máximas de Von Mises en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO23	73

Figura 125 – Tensiones máximas de Von Misses en rigidizadores verticales del cajón metálico para CO24	74
Figura 126 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO13	74
Figura 127 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO14	74
Figura 128 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO15	75
Figura 129 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO16	75
Figura 130 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO17	75
Figura 131 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO18	76
Figura 132 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO19	76
Figura 133 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO20	76
Figura 134 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO21	76
Figura 135 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO22	77
Figura 136 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO23	77
Figura 137 – Tensiones máximas de Von Misses en marco rígido del cajón metálico para CO24	77
Figura 138 – Mapa de distribución de tensiones en superficies del mástil	78
Figura 139 – Tensiones máximas en el mástil para CO13	78
Figura 140 – Tensiones máximas en el mástil para CO14	79
Figura 141 – Tensiones máximas en el mástil para CO15	79
Figura 142 – Tensiones máximas en el mástil para CO16	80
Figura 143 – Tensiones máximas en el mástil para CO17	80
Figura 144 – Tensiones máximas en el mástil para CO18	81
Figura 145 – Tensiones máximas en el mástil para CO19	81
Figura 146 – Tensiones máximas en el mástil para CO20	82
Figura 147 – Tensiones máximas en el mástil para CO21	82
Figura 148 – Tensiones máximas en el mástil para CO22	83
Figura 149 – Tensiones máximas en el mástil para CO23	83
Figura 150 – Tensiones máximas en el mástil para CO24	84
Figura 151 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO13	84

Figura 152 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO14	85
Figura 153 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO15	85
Figura 154 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO16	86
Figura 155 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO17	86
Figura 156 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO18	87
Figura 157 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO19	87
Figura 158 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO20	88
Figura 159 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO21	88
Figura 160 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO22	89
Figura 161 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO23	89
Figura 162 – Esfuerzos axiles en los tirantes para CO24	90

